



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN**  
**TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA**  
**TITULACIÓN DE GRADO EN GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

**SISTEMAS MULTIESPECTRALES E HIPERESPECTRALES PARA LA**  
**OBSERVACIÓN DEL TERRITORIO. ANÁLISIS Y APLICACIÓN A**  
**LA PROSPECCIÓN DE HIDROCARBUROS**

**Madrid, enero de 2015**

Alumno: Julián Rodríguez Villamizar

Tutor: Íñigo Molina Sánchez

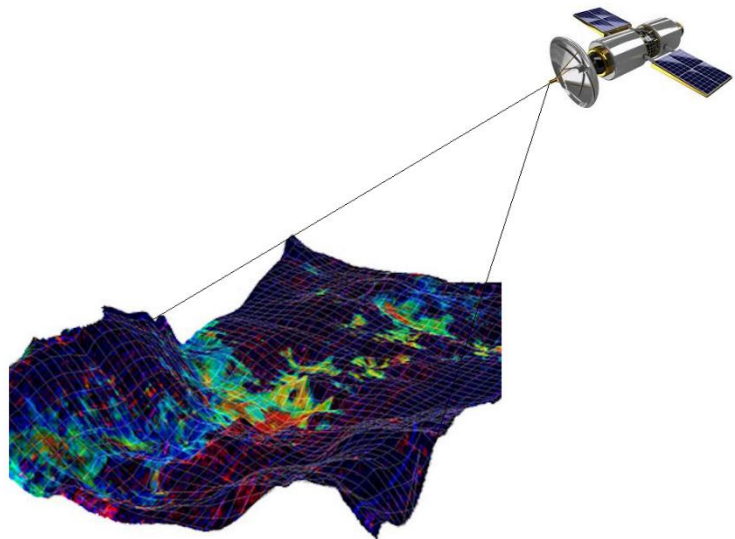
Cotutor: Antonio Vázquez Hoehne



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN TOPOGRAFÍA,**  
**GEODESIA Y CARTOGRAFÍA**  
**TITULACIÓN DE GRADO EN GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**SISTEMAS MULTIESPECTRALES E HIPERESPECTRALES PARA LA  
OBSERVACIÓN DEL TERRITORIO. ANÁLISIS Y APLICACIÓN A  
LA PROSPECCIÓN DE HIDROCARBUROS**



**Madrid, enero de 2015**

Alumno: Julián Rodríguez Villamizar

Tutor: Íñigo Molina Sánchez

Cotutor: Antonio Vázquez Hoehne





Mi más profundo agradecimiento va destinado a quienes, de forma directa o indirecta, han contribuido a mi formación académica y personal.



*“Mide lo que sea medible y haz medible lo que no lo sea”*

Galileo Galilei



## Índice

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTOS .....	15
1.1 Enfoque del problema .....	15
1.2 Objetivos .....	16
1.2.1 Objetivos principales.....	16
1.2.2 Objetivos secundarios .....	16
1.3 Antecedentes .....	17
1.4 Estado del arte .....	19
1.4.1 Identificación de anomalías inducidas por filtraciones de petróleo mediante datos registrados por satélite (Landsat-7/ETM+), Cuenca de Sangliao, China.....	19
1.3.2 Obtención de anomalías inducidas por microfiltraciones de petróleo en una región árida (Oeste de China) utilizando Teledetección multiespectral .....	22
1.3.3 Detección de la influencia de fugas de gas en vegetación mediante Teledetección hiperspectral .....	25
1.5 Fundamentos de la Teledetección .....	26
1.5.1 El sensor humano .....	27
1.5.2 Radiación electromagnética .....	28
1.5.3 Energía de una onda electromagnética.....	31
1.5.4 Cuantificación de la energía. Fotones .....	35
1.5.5 Análisis de los intervalos del espectro electromagnético que corresponden al visible y al infrarrojo cercano, también denominado como región óptica .....	37
1.5.6 Radiación térmica. Cuerpo negro.....	39
1.6 Fundamentos de los hidrocarburos.....	41
1.6.1 Definiciones básicas y teorías acerca de su formación .....	41
1.6.2 Modelos de formación de filtraciones .....	42
1.6.3 Análisis de la firma espectral de materiales con contenidos de hidrocarburos.....	44
 CAPÍTULO II. MATERIALES.....	 49
2.1 Características sensor e imagen multiespectral .....	50
2.1.1 Nivel de procesado .....	54
2.2 Características sensor e imagen hiperspectral .....	57
2.2.1 Nivel de procesado.....	58
2.2 Sistemas de observación espaciales (captura de datos). .....	58
2.2.1 Fuentes de error en la geometría. ....	60
2.2.2 Fuentes de error en la radiometría.....	63

2.2.3 Correcciones geométricas .....	64
2.2.4 Correcciones radiométricas aplicadas a imágenes capturadas por sensores multiespectrales .....	66
2.2.5 Correcciones radiométricas aplicadas a imágenes capturadas por otros sensores multiespectrales y sensores hiperespectrales. ....	73
2.3 Influencia atmosférica en el registro de datos .....	79
 CAPÍTULO III. METODOLOGÍA .....	81
3.1 Validación geométrica y radiométrica.....	81
3.1.1 Validación geométrica .....	81
3.1.2 Validación radiométrica .....	82
3.2 Estudio del medio físico .....	88
3.2.1 Región de interés.....	88
3.2.2 Geología y geomorfología de la zona de interés 1 .....	93
3.2.3 Climatología.....	102
3.2.4 Suelos y vegetación.....	109
3.2.5 Hidrogeología.....	119
3.3 Clasificaciones .....	126
3.3.1 Modelo de clasificación I .....	126
3.3.2 Modelo de clasificación II.....	127
3.3.3 Modelo de clasificación III .....	128
3.4 Obtención de temperaturas .....	129
3.4.1 Temperatura radiante .....	129
3.4.2 Temperatura de superficie.....	130
3.5 Obtención del Modelo Digital del Terreno de la escena registrada por el sensor ASTER.....	130
3.5.1 Generación del MDT.....	130
3.5.2 Verificación del MDT .....	131
3.6 Cálculo de anomalías en torno al campo petrolífero de Ayoluengo.....	131
3.6.1 Sensor ETM+ .....	132
3.6.2 Sensor ASTER .....	132
3.7 Localización directa de materiales con presencia de hidrocarburos mediante teledetección hiperespectral.....	133
3.7.1 Creación de un hipercubo.....	133
3.7.2 Optimización de imágenes capturadas por el sensor Hyperion.....	134
3.7.3 Aplicación del índice de hidrocarburos.....	134

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	135
4.1 Validación geométrica .....	135
4.1.1 Validación geométrica en imágenes multiespectrales.....	135
4.1.2 Validación geométrica imágenes hiperespectrales.....	136
4.2 Validación radiométrica .....	136
4.3 Corrección atmosférica .....	137
4.3.1 Corrección atmosférica en imágenes hiperespectrales.....	137
4.3.2 Corrección atmosférica en imágenes multiespectrales.....	140
4.4 Clasificaciones .....	148
4.4.1 Modelo de clasificación I.....	148
4.4.2 Modelo de clasificación II.....	150
4.4.3 Modelo de clasificación III .....	155
4.5 Obtención de temperaturas.....	157
4.5.1 Temperatura radiante.....	157
4.5.2 Temperatura de superficie.....	158
4.6 Obtención del MDT.....	160
4.6.1 MDT zona 1 .....	160
4.6.2 Validación MDT .....	161
4.7 Cálculo de anomalías en torno al campo petrolífero de Ayoluengo .....	163
4.8 Localización directa de materiales con presencia de hidrocarburos mediante teledetección hiperespectral.....	166
 CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN ....	168
5.1 Conclusiones.....	168
5.2 Líneas futuras de investigación .....	170
 CAPÍTULO VI. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y ESTUDIO ECONÓMICO .....	171
6.1 Presupuesto.....	171
Bibliografía.....	173
 ANEXOS .....	176
Curiosidades sobre el campo petrolífero de Ayoluengo.....	176





## Índice de figuras

Figura 1: esquema cuenca Kuqa. Fuente: Mapping hydrocarbon seepage-induced anomalies in the arid region, west China using multispectral remote sensing. ....	22
Figura 2: manifestaciones en superficie de anomalías por inducción de hidrocarburos. a) Blanqueamiento de estratos con contenidos de óxido de hierro; b) Conjuntos de venas generalmente de yeso; c) Fotografía de detalle caso a; d) Deformación en pliegue (anticlinal);E) Agrupaciones de petróleo en roca areniscosa; F) Macrofiltraciones en superficie. Fuente: Mapping hydrocarbon seepage-induced anomalies in the arid region, west China using multispectral remote sensing .....	23
Figura 3: a) Curvas de reflectividad registradas en muestras alteradas (KQ-11_15) pertenecientes al anticlinal Qiulitage. Curvas con aspa corresponden a los espectros registrados según la configuración espectral del satélite ASTER. Extremos relativos de las muestras alteradas que sugieren alteración se aprecian en los rectángulos con trazo discontinuo. b) Curvas de reflectividad en muestras no alteradas. Fuente: Mapping hydrocarbon seepage-induced anomalies in the arid region, west China using multispectral remote sensing. I: illita, K: kaolinita, C: calcita, D: dolomías. ....	24
Figura 4: imágenes ASTER de la región de interés. a) Imagen en escala de grises mediante el ratio 2/1; b) Imagen en escala de grises mediante el ratio 4/9; c) Composición falso color con los ratios 2/1(R), 3(G), 4/9(B); d) Imagen c con mayor escala. Fuente: Mapping hydrocarbon seepage-induced anomalies in the arid region, west China using multispectral remote sensing. ....	24
Figura 5: región de interés. Ventura (U.S.A.). Distinción de macrofiltración (seep), zona afectada por gas y zona no afectada. Fuente: Detecting the Influence of Gas Seepage on Vegetation using Hyperspectral Remote Sensing. ....	26
Figura 6: el ojo humano. Fuente: Imagi. ....	27
Figura 7: Curvas de sensibilidad del ojo humano, fotópica y escotópica. Fuente:Iluminet. ....	28
Figura 8: propagación de una onda electromagnética. Fuente: Amanda Mcpherson, UAF. ....	30
Figura 9: sección transversal que cruza un haz de radiación electromagnética. Fuente: Espectroscopía de Requena y Zúñiga, 2005.....	32
Figura 10: frente de onda esférico con un elemento diferencial de superficie sometido a una intensidad I. Fuente: Julián Rodríguez.....	34
Figura 11: espectro electromagnético. Fuente: Redorbit. ....	38
Figura 12: densidad de energía espectral de la radiación del cuerpo negro en función de la longitud de onda. Fuente: Escuela de Física Reino Unido.....	39

Figura 13: mecanismos de filtración (inset 2) por tectónica de placas. Localización: Barbados, isla del Caribe perteneciente a las Pequeñas Antillas. Corteza del Océano Atlántico subduce ante la placa del Caribe (placa continental). Fuente: Moore y otros 1988, Geological Society of America Bulletin.....	43
Figura 14: filtraciones debido a estratigrafía. Fuente: Schumacher, D., 1996, Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments y Physical Geology, Mcgeary y Plummer.....	43
Figura 15: modelo de filtraciones y anomalías registradas para algunos campos físicos además de algunas reacciones químicas. Fuente: Schumacher, D., 1996.....	44
Figura 16: muestras en contacto con hidrocarburos registradas con el espectrómetro MARK V. Fuente: Hörig y otros 2001.....	45
Figura 17: zum de la absorción ( $1.73 \mu$ ) que produce la firma espectral de un material en presencia de hidrocarburo. Fuente: Kühn y otros 2004. ....	45
Figura 18: firmas espectrales para arenas con distintos porcentajes de materiales bituminosos. Fuente: The Geosat Committee. ....	46
Figura 19: firma espectral arenas bituminosas con bajo contenido en bitumen. Fuente: Cloutis, 1989.....	47
Figura 20: firma espectral arenas bituminosas con contenido medio en bitumen. Fuente: Cloutis, 1989.....	47
Figura 21: firma espectral arenas bituminosas con alto contenido en bitumen. Fuente: Cloutis, 1989.....	48
Figura 22: biblioteca espectral con firmas de diferentes tipos de materiales con presencia de hidrocarburos. Fuente: Davis y Ellis 2000.....	48
Figura 23: resolución espectral en sensores multiespectrales e hiperespectrales. Fuente: Merrick & Company.....	49
Figura 24: resolución espacial VS resolución espectral. Fuente: NASA.....	50
Figura 25: distribución de PCM en la escena de interés. Fuente: USGS.....	56
Figura 26: estructura nivel de datos L1B. Fuente: ASTER handbook.....	56
Figura 27: situación espacio-temporal para los satélites Landsat-7 EO-1. Fuente: EO1 data user guide.....	57
Figura 28: dominios de captura de datos para sensores activos y pasivos. Fuente: Science Education through Earth Observation for High Schools. Programme of the European Commission.....	59
Figura 29: tipos de escáner de registro de datos. Clasificación atendiendo a la mecánica del sensor. Fuente: Remote Sensing from air and space, Olsen (2007).....	59
Figura 30: perturbaciones de las órbitas producidas por la Luna y el Sol. Fuente: Pratt, 2003.....	61

Figura 31: distorsiones por perturbación orbital. Fuente: Remote Sensing and Image Interpretation, Kiefer and Lillesand (2004).....	61
Figura 32: distorsión tangencial. Fuente: Remote Sensing and Image Interpretation, Kiefer and Lillesand (2004). .....	62
Figura 33: cambio en la unidad de resolución en el terreno. Fuente: Remote Sensing and Image Interpretation, Kiefer and Lillesand (2004).....	62
Figura 34: error debido a la topografía. Fuente: Liang-Chien Chen, 2011.....	63
Figura 35: tipos de reflectividad atendiendo a la rugosidad de la superficie del objeto. Fuente: Remote Sensing and Image Interpretation, Kiefer and Lillesand (2004).....	63
Figura 36: efectos de los coeficientes de los polinomios. Modelización de distorsión. Fuente: Schowengerdt, 2006.....	66
Figura 37: (a) Conjunto de fibras unidas a un brazo oscilante conectadas a seis registros de luz. (b) Fuentes de iluminación y trayectoria seguida por la energía radiada. (c) Muestra del filtro correspondiente a cada fuente de iluminación. Fuente: Radiometric Calibration of Landsat, ASPRS, 1997. ....	69
Figura 38: zona de estudio en combinación falso color con pérdida de información en algunos píxeles. Fuente: USGS, imagen Landsat-7 (ETM+), 9 de septiembre 2014, Embalse del Ebro, España. ....	69
Figura 39: zona de estudio en combinación falso color con interpolación en píxeles perdidos. Fuente: USGS, imagen Landsat-7 (ETM+), 9 de septiembre 2014, Embalse del Ebro, España. ....	70
Figura 40: sistema de observación, registro y calibración para los sensores ASTER que registran en: visible e infrarrojo próximo (imagen superior) e infrarrojo medio (imagen inferior). Fuente: Hiroyuki Fujisada, Terra ASTER Instrument Design and Geometry. ....	74
Figura 41: sistema de observación, registro y calibración para el sensor ASTER que registran en el infrarrojo térmico. Fuente: Hiroyuki Fujisada, Terra ASTER Instrument Design and Geometry.....	75
Figura 42: fenómeno de interferencia lumínica por características de la banda 4. En la imagen a) Luz reflejada y posteriormente refractada en la capa de SiO <sub>2</sub> , generando un aporte energético en las bandas vecinas. En la imagen b) refracción que se produce debido al filtro de interferencia. ....	76
Figura 43: corrección de sub-escena del efecto crosstalk. A) Polinomio de grado 1 con corrección aditiva. B) Polinomio de grado 1 con corrección multiplicativa. C) Polinomio de grado 2 con corrección aditiva. D) Polinomio de grado 2 con corrección multiplicativa. ....	77
Figura 44: depuración de imágenes defectuosas sensor Hyperion. De izquierda a derecha imágenes correspondientes a las bandas: 4, 121, 166, 213. ....	78

Figura 45: diagrama de flujo definido para la validación geométrica. ....	81
Figura 46: mapa geológico simplificado del sector suroccidental de la cuenca Vasco-Cantábrica mostrando la situación del campo de Ayoluengo. Cuenca alta del Ebro. Fuente: Quesada, Robles y otros, 1996. ....	89
Figura 47: distribución de roca madre vinculada a yacimientos de hidrocarburos en la cuenca Mediterránea. Fuente: Unconventional Petroleum Plays in the Mediterranean Basins, Spathopoulos. ....	89
Figura 48: zonas no convencionales con potencial de encontrar reservas de hidrocarburos. Fuente: Unconventional Petroleum Plays in the Mediterranean Basins, Spathopoulos. ....	90
Figura 49: Provincias que contienen parte de la sub-escena. Escala mapa: 1:800.000. Edición cartográfica: propia. ....	91
Figura 50: zonas de interés para datos hiperespectrales. Escala mapa: 1:800.000. Edición cartográfica: propia. ....	92
Figura 51: fotografías pertenecientes a lugares de la sub-escena 1 (zona 1). Fuente: Google Earth. ....	93
Figura 52: núcleos de población (elementos color rojo) alrededor del río Ebro. Fuente: MTN1:50.000, hoja 134. ....	94
Figura 53: altimetría e hidrografía de la hoja 134 en formato vectorial del MTN 1:50.000. Fuente: Instituto Geográfico Nacional. ....	94
Figura 54: altimetría e hidrografía de la hoja 135 en formato vectorial del MTN 1:50.000. Fuente: Instituto Geográfico Nacional. ....	96
Figura 55: unidades morfoestructurales que lindan con la zona 1- Fuente: Dinámica de un espacio natural: los cañones calcáreos del Ebro (Burgos), Memoria de Licenciatura presentada por Raquel González Pellejero. ....	97
Figura 56: recorte mapa geológico hoja 134 (Polientes). 11. Conglomerados silíceos en la base, arenas blancas caoliníferas, gravas con estratificaciones cruzadas y arcillas grises y negras 12. Arenas blancas, arcillas grises y negras con pasada de calizas arenosas. 13. Margas arenosas gris-blancuecinas. 14. Caliza de diferente tipología. 15. Margas calcáreas y calizas arenosas. Fuente: IGME. ....	99
Figura 57: macizo calcáreo de la Lora. Estructura y litología. Fuente: Dinámica de un espacio natural: los cañones calcáreos del Ebro (Burgos), Memoria de Licenciatura presentada por: Raquel González Pellejero. ....	100
Figura 58: corte geológico a la plataforma burgalesa. Fuente: Memoria hoja 134 segunda serie MAGNA, IGME. ....	100

Figura 59: materiales atravesados por los ríos Ebro y Rudrón. Fuente: Dinámica de un espacio natural: los cañones calcáreos del Ebro (Burgos), Memoria de Licenciatura presentada por: Raquel González Pellejero.....	101
Figura 60: fotografía de un meandro perteneciente al cañón del río Ebro (La Hoz de la Hundida). Fuente: Félix Fernández Rodríguez. ....	102
Figura 61: gráfico correspondiente a las temperaturas registradas en Sargentos de la Lora para el año 1980. Unidades: ° C. ....	103
Figura 62: gráfico correspondiente a las precipitaciones registradas en Sargentos de la Lora para el año 1980. Unidades: milímetros. ....	103
Figura 63: clasificación climática según el modelo climatológico Köppen- Geiger. Fuente: AEMET.....	105
Figura 64: sinopsis sobre la temperatura registrada en la estación climatológica de Villafría. TA: temperatura media de las máximas; TI: temperatura media de las mínimas; TMA: temperatura máxima absoluta; TMI: temperatura mínima absoluta. ....	105
Figura 65: serie cartográfica basada en el registro puntual de temperatura del aire por estaciones climatológicas. Cartografía ordenada según los meses del año empezando en Enero, primer mapa izquierdo, y finalizando en diciembre correspondiente al último mapa derecho. Fuente: AEMET.....	107
Figura 66: gráfica descriptiva del registro de precipitaciones en Villafría. P: precipitación total media. PM: precipitación máxima diaria. Fuente: AEMET.....	108
Figura 67: clasificación en función del tipo de suelo, tomando como referencia la categorización propuesta por la Organización de las Naciones Unidas de Alimentación y Agricultura. Fuente datos: Francisco Javier López Acevedo. Edición cartográfica: propia en configuración. Leyenda elaborada por UNESCO. ....	110
Figura 68: detalle cartografía edafológica Atlas Nacional de España. Fuente: IGN. ....	111
Figura 69: clasificación de los suelos atendiendo a las competencias agrícolas. Fuente: ITGE. ....	114
Figura 70: clasificación del MDT del MTN hojas 134 y 135, según altitudes. ....	115
Figura 71: clasificación del MDT del MTN 1:50000, hojas 134 y 135, según los grados de la pendiente. ....	116
Figura 72: clasificación general vegetación autóctona región de interés. De primera fotografía (izquierda) a última: Quercus ilex (ejemplar encina no perteneciente a la zona 1), chopos bajo Peña Camesía (Ebro),cereales (Polientes), Cerro de Sargentos, Bustidoño (Cantabria), Quintanilla de Santa Gadea (vista aérea), Arroyo Campo de Yuso (Cantabria). Fuente: Google Earth. ....	118

Figura 73: clasificación vegetación región de interés. 1, encinares de <i>Spiraeo-Quercetum rotundifoliae</i> ; 2, quejigares de <i>Spiraeo-Quercetum fagineae</i> ; 3, melojares de <i>Festuco-Quercetum pyrenaicae</i> ; 4, hayedos de <i>Epipactido-Fagetum</i> . Fuente: Casas, Fuertes y otros, 1992. ....	119
Figura 74: en rojo cuenca del Ebro, en azul otras cuencas. Fuente: Confederación Hidrológica del Ebro. ....	120
Figura 75: cartografía descriptiva de la distribución de aguas superficiales a lo largo de la cuenca del Ebro. Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro. ....	120
Figura 76: cartografía descriptiva de la distribución de aguas subterráneas a lo largo de la cuenca del Ebro. Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro. ....	121
Figura 77: delimitación de cuenca correspondiente a la zona 1. Fuente cartografía: mapa provincial de Burgos 1:200.000. ....	122
Figura 78: clasificación de cuenca hidrográfica en función de la altitud. ....	123
Figura 79: clasificación del mapa de pendientes en cinco clases. Dominio espacial acotado en la proyección ortogonal de la cuenca de interés sobre el plano xy. ....	124
Figura 80: clasificación de la red hídrica en función del modelo propuesto por Strahler. ....	124
Figura 81: curva hipsométrica. ....	125
Figura 82: clasificación de material mineral según el modelo de clasificación III. ....	128
Figura 83: hipercubo correspondiente a imagen hiperespectral. ....	133
Figura 84: validación geométrica de imágenes multiespectrales. Imagen superior izquierda capturada por el sensor TM-4; imagen superior derecha capturada por el sensor ETM+; imagen inferior izquierda capturada por el sensor OLI; imagen inferior derecha capturada por el sensor ASTER. ....	135
Figura 85: evaluación geométrica en imagen hiperespectral. ....	136
Figura 86: perfiles correspondientes al agua del embalse del Ebro (izquierda) y vegetación (derecha). De arriba a abajo: sensores TM-4, ETM+, OLI y ASTER. ....	137
Figura 87: imágenes adquiridas por el sensor Hyperion y corregidas mediante el módulo de corrección atmosférica FLAASH. De izquierda a derecha, imagen más próxima a la escena 1 hacia el oeste. Imágenes próximas a la escena 1 dirección este (estas dos imágenes proceden de la misma zona pero en donde una tiene nubes la otra no). ....	138
Figura 88: imágenes adquiridas por el sensor Hyperion y corregidas mediante el módulo de corrección atmosférica QUAC. De izquierda a derecha: Imagen más próxima a la escena hacia el oeste. Imágenes próximas a la escena dirección este (estas dos imágenes proceden de la misma zona pero en donde una tiene nubes la otra no). ....	138

Figura 89: firmas espectrales para la imagen capturada al oeste del área de interés. Firma espectral superior de la imagen corregida mediante el módulo FLAASH. Firma espectral inferior de la imagen corregida mediante el módulo QUAC. ....	139
Figura 90: firmas espectrales para la imagen 1 capturada al este del área de interés. Firma espectral inferior de la imagen corregida mediante el módulo FLAASH. Firma espectral superior de la imagen corregida mediante el módulo QUAC. ....	139
Figura 91: firmas espectrales para la imagen 2 capturada al este del área de interés. Firma espectral superior de la imagen corregida mediante el módulo FLAASH. Firma espectral inferior de la imagen corregida mediante el módulo QUAC. ....	140
Figura 92: firmas espectrales correspondientes al área de interés. De izquierda a derecha, firma espectral obtenida de la imagen corregida utilizando el módulo FLAASH. Firma espectral obtenida de la imagen corregida utilizando el módulo QUAC. Firma espectral obtenida de la imagen corregida utilizando el modulo DOS. ....	141
Figura 93: sub-escena (zona 1) correspondiente a la banda 4 corregida atmosféricamente mediante el modelo DOS. Imágenes en escala de grises. ....	145
Figura 94: sub-escena (zona 1) correspondiente a la banda 4 corregida atmosféricamente mediante el modelo DOS. Imágenes en escala de color jet. ....	146
Figura 95: aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. A) Imagen capturada por el sensor SPOT (Fuente: IBERPIX). B) NDVI calculado para las bandas 3 y 4 de la sub-escena registrada por el sensor ETM+. C) Ídem B) pero en escala color jet. D) Clasificación: vegetación densa (roja) y vegetación dispersa (verde). Dicha clasificación fue proyectada sobre la banda 2. ....	147
Figura 96: estabilización de $\tau$ para el modelo DOS-4. ....	148
Figura 97: evolución del coeficiente kappa en función del número de clases. ....	148
Figura 98: clasificación supervisada considerando el número de clases que presentan un coeficiente kappa óptimo. ....	149
Figura 99: separabilidad espectral para sub-escena registrada por el sensor TM4. ....	152
Figura 100: clasificación supervisada aplicando el modelo II. ....	154
Figura 101: clasificación no supervisada aplicando el modelo III. ....	156
Figura 102: comparación visual entre la clasificación III y la ortofoto del PNOA. Fuente ortofoto: IGN. ....	156
Figura 103: temperatura radiante registrada por la banda térmica 1 del sensor OLI. ....	157
Figura 104: temperatura radiante registrada por la banda térmica 2 del sensor OLI. ....	158
Figura 105: temperaturas de superficie obtenidas mediante el sensor ASTER. ....	159
Figura 106: temperaturas de superficie obtenidas mediante el sensor TM-4. ....	159
Figura 107: Modelo Digital del Terreno de la zona 1. ....	161

Figura 108: verificación MDT mediante superposición de cartografía. ....	161
Figura 109: altitudes de la zona 1 obtenidas a partir del MDT. ....	162
Figura 110: estadísticos obtenidos del MDT de la zona1. ....	162
Figura 111: aplicación de componentes principales a imagen ETM+ y posterior representación en falso color. ....	163
Figura 112: materiales probablemente influidos por la presencia de hidrocarburos. ....	164
Figura 113: detalle de posibles zonas alteradas por la influencia de hidrocarburos. ....	164
Figura 114: posibles alteraciones de materiales compuestos fundamentalmente por carbonato cálcico. ....	165
Figura 115: posibles alteraciones de materiales compuestos fundamentalmente por óxidos de hierro. ....	165
Figura 116: puntos con posible presencia de hidrocarburos. Perfiles espectrales asociados a los puntos en cuestión. El inferior corresponde al perfil rojo, mientras que, el superior corresponde al perfil azul. ....	167
Figura 117: diagrama de Gantt con asignación de recursos. ....	172
Figura 118: machine de extracción de petróleo localizado en Ayoluengo. Fuente: Kurrus. .....	177
Figura 119: evolución de la extracción de hidrocarburos de la reserva de Ayoluengo. Fuente: nataliamunozrujas. ....	177



## Índice de tablas

Tabla 1: características espectrales de agrupaciones minerales inducidas por filtraciones de petróleo en bandas registradas según el sensor ETM+. Fuente: Identifying hydrocarbon leakage induced anomalies using Landsat-7 /ETM+ data processing techniques in the west slope of Songliao basin, China. ....	20
Tabla 2: autovectores y autovalores de 1345-CP3. Fuente: Identifying hydrocarbon leakage induced anomalies using Landsat-7 /ETM+ data processing techniques in the west slope of Songliao basin, China. ....	21
Tabla 3: agrupación mineral en cuanto a imagen mejorada. Fuente: Identifying hydrocarbon leakage induced anomalies using Landsat-7 /ETM+ data processing techniques in the west slope of Songliao basin, China.....	22
Tabla 4: características espectrales sensor MSS a bordo del satélite Landsat-4.....	51
Tabla 5: características espectrales sensor TM a bordo del satélite Landsat-4.....	51
Tabla 6: características espectrales sensor ETM+ a bordo del satélite Landsat-7.....	52
Tabla 7: características espectrales sensor OLI a bordo del satélite Landsat-8.....	53
Tabla 8: características espectrales sensor ASTER.....	54
Tabla 9: parámetros de procesado para datos descargados en el nivel 1T.....	55
Tabla 10: archivos que vienen con las imágenes. En rojo el nivel descargado para los datos del presente proyecto. Fuente: USGS.....	55
Tabla 11: características espectrales sensor Hyperion.....	57
Tabla 12: factores de ganancia y sesgo para una imagen tomada por el sensor TM del programa Landsat-4.....	72
Tabla 13: parámetros morfométricos cuenca zona 1.....	125
Tabla 14: tabla que asigna un VMI para cada banda en función de la bruma presente en la escena.....	142
Tabla 15: tabla que asigna un VMI para cada banda en función de la bruma presente en la escena.....	142
Tabla 16: ND mínimo registrado para cada banda capturada por el sensor ETM+.....	142
Tabla 17: verificación modelos DOS programados en Matlab.....	143
Tabla 18: distancia bhattacharrya clasificación imagen TM-4.....	149
Tabla 19: matriz de contingencia para la clasificación de la imagen capturada por el sensor TM-4.....	150
Tabla 20: separabilidad espectral entre clases. Método divergencia transformada y distancia jeffrias-matusita.....	151
Tabla 21: matriz de contingencia correspondiente al modelo de clasificación II.....	154
Tabla 22: recursos y cuantía económica.....	171



## **RESUMEN**

La observación de la Tierra es una herramienta de gran utilidad en la actualidad para el estudio de los fenómenos que se dan en la misma. La observación se puede realizar a distintas escalas y por distintos métodos dependiendo del propósito. El actual Trabajo Final de Grado persigue exponer la observación del territorio mediante técnicas de Teledetección, o Detección Remota, y su aplicación en la exploración de hidrocarburos.

Desde la Segunda Guerra Mundial el capturar imágenes aéreas de regiones de la Tierra estaba restringido a usos cartográficos en el sentido estricto. Desde aquellos tiempos, hasta ahora, ha acontecido una serie de avances científicos que permiten deducir características intrínsecas de la Tierra mediante mecanismos complejos que no apreciamos a simple vista, pero que, están configurados mediante determinados parámetros geométricos y electrónicos, que permiten generar series temporales de fenómenos físicos que se dan en la Tierra. Hoy en día se puede afirmar que el aprovechamiento del espectro electromagnético está en un punto máximo. Se ha pasado del análisis de la región del espectro visible al análisis del espectro en su totalidad. Esto supone el desarrollo de nuevos algoritmos, técnicas y procesos para extraer la mayor cantidad de información acerca de la interacción de la materia con la radiación electromagnética.

La información que generan los sistemas de captura va a servir para la aplicación directa e indirecta de métodos de prospección de hidrocarburos. Las técnicas utilizadas en detección por sensores remotos, aplicadas en campañas geofísicas, son utilizadas para minimizar costes y maximizar resultados en investigaciones de campo. La predicción de anomalías en la zona de estudio depende del analista, quien diseña, calcula y evalúa las variaciones de la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre. Para dicha predicción se revisarán distintos programas espaciales, se evaluará la bondad de registro y diferenciación espectral mediante el uso de distintas clasificaciones (supervisadas y no supervisadas). Por su influencia directa sobre las observaciones realizadas, se realiza un estudio de la corrección atmosférica; se programan distintos modelos de corrección atmosférica para imágenes multiespectrales y se evalúan los métodos de corrección atmosférica en datos hiperespectrales. Se obtendrá temperatura de la zona de interés utilizando los sensores TM-4, ASTER y OLI, así como un Modelo Digital del Terreno generado por el par estereoscópico capturado por el sensor ASTER. Una vez aplicados estos procedimientos se aplicarán los métodos directos e indirectos, para la localización de zonas probablemente afectadas por la influencia de hidrocarburos y localización directa de hidrocarburos mediante teledetección hiperespectral. Para el método indirecto se utilizan imágenes capturadas por los sensores ETM+ y ASTER. Para el método directo se usan las imágenes capturadas por el sensor Hyperion.



## **ABSTRACT**

The observation of the Earth is a wonderful tool for studying the different kind of phenomena that occur on its surface. The observation could be done by different scales and by different techniques depending on the information of interest. This Graduate Thesis is intended to expose the territory observation by remote sensing acquiring data systems and the analysis that can be developed to get information of interest.

Since Second World War taking aerials photographs of scene was restricted only to a cartographic sense. From these days to nowadays, it have been developed many scientific advances that make capable the interpretation of the surface behavior trough complex systems that are configure by specific geometric and electronic parameters that make possible acquiring time series of the phenomena that manifest on the earth's surface. Today it is possible to affirm that the exploitation of the electromagnetic spectrum is on a maxim value. In the past, analysis of the electromagnetic spectrum was carry in a narrow part of it, today it is possible to study entire. This implicates the development of new algorithms, process and techniques for the extraction of information about the interaction of matter with electromagnetic radiation.

The information that has been acquired by remote sensing sensors is going to be a helpful tool for the exploration of hydrocarbon through direct and vicarious methods. The techniques applied in remote sensing, especially in geophysical campaigns, are employed to minimize costs and maximize results of ground-based geologic investigations. Forecasting of anomalies in the region of interest depends directly on the expertise data analyst who designs, computes and evaluates variations in the electromagnetic energy reflected or emanated from the earth's surface. For an optimal prediction a review of the capture system take place; assess of the goodness in data acquisition and spectral separability, is carried out by mean of supervised and unsupervised classifications. Due to the direct influence of the atmosphere in the register data, a study of the minimization of its influence has been done; a script has been programed for the atmospheric correction in multispectral data; also, a review of hyperspectral atmospheric correction is conducted. Temperature of the region of interest is computed using the images captured by TM-4, ASTER and OLI, in addition to a Digital Terrain Model generated by a pair of stereo images taken by ASTER sensor. Once these procedures have finished, direct and vicarious methods are applied in order to find altered zones influenced by hydrocarbons, as well as pinpoint directly hydrocarbon presence by mean of hyperspectral remote sensing. For this purpose ETM+ and ASTER sensors are used to apply the vicarious method and Hyperion images are used to apply the direct method.



## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTOS

En esta sección se pretende dar una perspectiva del problema a resolver, así como de los fundamentos teóricos que sustentan todos los procedimientos que se desarrollen.

En los siguientes apartados se pretende definir el problema a resolver, estudiar la metodología actual para la resolución de este tipo de problemas (incluyendo casos prácticos) y fundamentos que facilitan y/o permiten la aplicación de dichas metodologías.

### 1.1 Enfoque del problema

El problema que se pretende abordar en este Trabajo Fin de Grado es la exploración de recursos naturales mediante distintos programas espaciales. La exploración de recursos naturales es uno de los cometidos de la Geofísica. A través de distintos métodos geofísicos se logra hacer una exploración del subsuelo. Cabe esperar que muchos de los fenómenos que suceden en el subsuelo presenten cambios en su entorno más próximo, ya sea mediante la alteración de algún campo físico o mediante una transformación que involucre procesos químicos y geológicos, entre otros, que sugieran la presencia del recurso. El caso de la exploración de hidrocarburos es uno de los temas de interés del presente proyecto. Los hidrocarburos son un recurso natural de gran valor según la época actual. Los hidrocarburos forman parte de los principales indicadores económicos a nivel mundial debido a su demanda diaria, dicho contexto desafía a las distintas ramas de la ingeniería a su búsqueda, extracción y tratamiento según procesos óptimos en relación coste-tiempo. El problema que aquí se plantea es el de acotar el dominio de búsqueda, o dominio espacial, para seguir con otros métodos de exploración que permiten el dimensionamiento del yacimiento en cuestión, además de la obtención de otras propiedades del mismo y de la zona que linda con él.

Para lograr acotar el espacio de búsqueda de un yacimiento de hidrocarburos se proponen métodos directos y métodos indirectos (Arnout van der Wer, 2006; Sanaz Salati, 2014 y otros). Se definen como métodos directos de exploración aquellos en los que se puede localizar pequeñas fugas de hidrocarburos en superficie, ya sea en forma de crudo o en forma de gas. Para utilizar este método conviene utilizar imágenes tomadas mediante sensores hiperespectrales ya que cuentan con resolución espectral amplia y suficiente de la que se puede obtener caracterización espectral de materiales con presencia de petróleo (Khun, 2001; Cloutis, 1989). La firma espectral media (o teórica), de algunos materiales con presencia de hidrocarburos presenta extremos relativos en bandas específicas del espectro electromagnético que pasarían inadvertidas por sensores multiespectrales. Por otro lado, los métodos indirectos de exploración pretenden detectar la influencia de la reserva en los alrededores de la misma. Se intenta buscar patrones naturales alterados ya sea en vegetación, roca o suelo. Dado que un estudio amplio de la zona nos permite comparar en la misma diversas características de la escena en cuestión, se utilizan en este método

imágenes tomadas por sensores multiespectrales. Para lograr una correcta detección por cualquiera de los dos métodos hace falta una corrección atmosférica rigurosa. Se revisarán distintos modelos para elegir el modelo óptimo que se ajuste a los propósitos que se persiguen.

## **1.2 Objetivos**

Una vez definido el problema se pretende abordar su resolución mediante los siguientes objetivos.

### **1.2.1 Objetivos principales**

En primer lugar se realiza la revisión de literatura relacionada con los temas del proyecto. En este objetivo se pretende establecer similitudes y diferencias vinculadas con el presente proyecto, a modo de seguir sus metodologías y consideraciones en la aplicación práctica del presente Trabajo Fin de Grado. En segundo lugar se adquieren y tratan los datos multiespectrales. Para la adquisición se considera el estudio del programa óptimo del cual se van a adquirir los datos, las correcciones geométricas y radiométricas. Se estudiará en profundidad (considerando el alcance del presente proyecto) la corrección atmosférica; se revisarán sendos modelos de corrección atmosférica llegando a programar algunos de ellos mediante el software Matlab. Con los datos depurados, se intentará definir anomalías en suelo, roca o vegetación. Para ello se utilizarán distintos métodos de tratamiento de la imagen digital. Se establecerá una comparativa y se obtendrán conclusiones. En tercer lugar se obtienen y se aplica un tratamiento a los datos hiperspectrales. En la obtención se considera la elección del programa espacial, adecuación de los datos (incluyendo las correcciones necesarias para optimizar el análisis), cálculo de los índices de hidrocarburos para su localización directa (en el caso de que exista) y establecer un flujo de trabajo organizado.

### **1.2.2 Objetivos secundarios**

En primer lugar se desarrolla una planificación y organización de tareas que permita alcanzar los objetivos primarios. En el transcurso del proyecto se incluirán procedimientos relacionados con la Teledetección, que permitan aprovechar los datos obtenidos; por ejemplo el cálculo del modelo digital del terreno mediante el sensor ASTER. En segundo lugar se formaliza un presupuesto atendiendo a la valoración media de un técnico en Teledetección y a los demás factores que intervienen en la elaboración del presente trabajo. Finalmente se busca la familiarización con software científico. Antes que la evaluación o la comparación entre software se establece la complementariedad entre el software utilizado. Para el procesado de imágenes se utilizará el software ENVI 5.0 SP2, para otros análisis y programación de modelos de corrección



atmosférica se utilizará Matlab 2013. También se utiliza software auxiliar como es SOV, Arcgis 10.2, R, IDRISI, Word, y otros.

### **1.3 Antecedentes**

En este apartado se pretende hacer una revisión de la evolución de algunos de los programas espaciales utilizados en Teledetección. Dicha revisión se ajusta a los temas que estén vinculados con el actual proyecto. Además, se resume la evolución de la exploración de hidrocarburos por técnicas de Teledetección.

En la historia de los programas espaciales destacan los primeros programas: Sputnik I y the Mercury. El primero desarrollado por los rusos y el segundo desarrollado como respuesta por parte de los Estados Unidos. En ese contexto la toma de imágenes, por sensores espaciales o por una cámara aerotransportada, estaba restringida al uso cartográfico con finalidad militar. Gracias a los avances realizados en distintas ciencias se ha logrado extraer una cantidad de información de las imágenes que permite inferir la manera en la que la Tierra interactúa con la radiación electromagnética. El programa que materializa dichos avances es Earth Resources Technology Satellite (ERTS-1), programa renombrado como Landsat-1. Este programa espacial sentó las bases sobre el campo de la Teledetección (Gupta, 1991 y otros). El programa se caracteriza por incorporar un sensor multiespectral de cuatro bandas además de llevar un sistema de almacenamiento interno. El desarrollo y mejora de este programa, además de un exhaustivo análisis de la atmósfera y de las propiedades espectrales del medio físico, ha permitido el lanzamiento de programas multiespectrales que incorporan un mayor número de bandas así como una mejora en el diseño del satélite. Algunos programas mejorados de la versión ERTS-1 son: Thematic Mapper (TM) el cual fue desarrollado e implementado en el satélite Landsat-4, Landsat-ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Estos programas han sido utilizados alrededor del mundo, y según distintos intereses, desde 1982 por sus prestaciones en resolución espacial y espectral.

Conviene citar la evolución que se produjo para poner en órbita los satélites, ya que esto dio pie a otros países, diferentes de Rusia y de Estados Unidos, al desarrollo de sus propios programas espaciales. Los trasbordadores espaciales, cuyo cometido consistía en poner satélites en órbita (órbita tipo Low Earth Orbit (LEO<sup>1</sup>)) y traerlos de vuelta a la superficie terrestre, fueron los que se encargaron de facilitar la tarea. Algunos de los experimentos realizados son: Metric Camera, Electronic Scanner MOMS y Shuttle Imaging Radar Series (SIR-A-B-C). Este avance es de vital importancia y queda materializado en programas como: Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT) desarrollado por los franceses, Indian Remote Sensing (IRS) desarrollado por los indios, entre otros programas.

---

<sup>1</sup> Low Earth Orbit: Órbitas geocéntricas de 200 hasta 2000 km de altitud.

Otro avance significativo fue el desarrollo de los vectores de área *charge-coupled device* (CCD). Esto permitió el paso de la imagen analógica a la digital. Con la llegada de la imagen digital se persigue una mejora tanto electrónica como algorítmica en su diseño e implementación, en calidad de registro, procesamiento de datos y almacenamiento. Las mejoras son considerables y han permitido obtener una mejor resolución espacial. Algunos programas espaciales que incluyen la mejora en la resolución espacial son: IKONOS-2, QuickBird-2 y otros. Dichos programas son denominados como: *high spatial resolution remote sensing*, lo que admite traducción como teledetección de alta resolución espacial (tienen precisión media de 0.5-1 m).

Una vez conseguida una mejora en la resolución espacial, se plantea la incógnita de en qué medida se puede mejorar la resolución espectral. Esto supuso el desarrollo de sensores hiperspectrales o hipercubos. La diferencia entre un sensor multiespectral y un sensor hiperspectral se encuentra fundamentalmente en el número de bandas y en el ancho de bandas. Así mientras que un sensor multiespectral llega a registrar en 10 bandas, un sensor hiperspectral puede llegar a registrar en más de 200 bandas. Algunos programas desarrollados son: Hyperion que pertenece al programa elaborado por la NASA Earth Observing 1, ARIES programa desarrollado por Australia, entre otros.

Evolución de la prospección de hidrocarburos por técnicas de teledetección:

I. Uno de los pioneros en utilizar fotografías tomadas desde el espacio, de la misión Gemini, y sin fines cartográficos fue Trollinger en 1968. Trollinger vio en las imágenes que tenía de la escena *Delaware Basin of West Texas* una disposición gráfica que mostraba elementos relacionados entre sí. Se le ocurrió la idea de relacionar la información gráfica de la que disponía con un posible método para la localización de recursos naturales. Además de relacionar la imagen con la exploración, logró identificar manifestaciones en superficie de estructuras profundas en la corteza terrestre. Hasta entonces sólo se tenía información de dicho fenómeno por datos adquiridos mediante procesos geofísicos in-situ (Colwell, 1983).

II. Saunders y otros (1973) llevaron a cabo un estudio sistemático de imágenes capturadas por ERTS-1 de los siguientes estados: Texas (*west-side*), New Mexico, Colorado y Montana-Wyoming. En su estudio demostraron que en la mayoría de los casos había una correlación entre la disposición de alineamientos geológicos/geomorfológicos con yacimientos de hidrocarburos (Colwell, 1983).

III. En 1986 Floyd Sabins publica el libro: *Remote Sensing, Principles and Interpretation*. En esta edición se dedican varias páginas a la exploración de hidrocarburos. Sobre todo la aplicación inmediata de las imágenes capturadas por satélite sirven para la identificación de

estructuras geológicas características. Se reunió gran parte de distintas investigaciones sobre la materia en cuestión. Berger Zeev (1994) sigue la línea de sus antecesores en su obra: *Satellite Hydrocarbon Exploration and Integration Techniques*. Esta obra es de gran interés ya que en la primera parte expone temas relacionados con los fundamentos de la imagen. En los fundamentos se incluye captura, procesamiento, interpretación e integración. La exposición de esta parte se ajusta a la descripción de la tecnología presente en la época en la que fue publicado el libro. En esta parte también se incluye un exhaustivo y minucioso análisis sobre el reconocimiento y diagnóstico de características de la superficie terrestre (incluyendo todas las morfoestructuras que se dan sobre la corteza y su exposición ante distintos sistemas de captura de imagen). En la segunda parte se incluye una serie de casos históricos. Destaca el siguiente caso (en relación al objetivo que persigue el actual proyecto), *The Velma Field, Oklahoma*. Para dicho caso práctico se establece un estudio de:

- Detección de anomalías en superficie como consecuencia de la presencia de reservas de hidrocarburos en el subsuelo.
- Conceptos sobre la clasificación del medio físico para definir el marco estratigráfico de cuencas sedimentarias, además de identificar procesos evolutivos en rocas y suelos.
- Uso de imágenes tomadas por satélite con fines logístico y medioambiental, relacionadas con actividades asociadas a la exploración y extracción de hidrocarburos.

A partir de aquí la única novedad se encuentra en la utilización de imágenes hiperespectrales y en su tratamiento. No se ha encontrado bibliografía específica, pero hay una gran variedad de artículos y algunas tesis doctorales.

## **1.4 Estado del arte**

En este apartado se pretende resumir distintos proyectos que se han realizado en calidad de prospección de hidrocarburos mediante teledetección. Esto llevará a un análisis del estado en el que se encuentra la metodología seguida en la actualidad para proyectos similares.

### **1.4.1 Identificación de anomalías inducidas por filtraciones de petróleo mediante datos registrados por satélite (Landsat-7/ETM+), Cuenca de Sangliao, China**

En primer lugar el artículo realiza una introducción a los procesos geológicos que dan lugar a la filtración de petróleo. Realiza también una descripción geológica de la zona y de los datos que se van a utilizar. Lo que se ha encontrado interesante se añade a continuación. Tratamiento de la imagen capturada por el satélite Landsat-7:

Se establece un tratamiento ateniendo a tres metodologías: análisis de componentes principales (ACP), ratios entre diferentes bandas y composición falso color (CFC).

Para el análisis de componentes fundamentales, o principales, se realiza una transformación lineal en N dimensiones, que para los procesos de teledetección el orden de dimensión (N) coincide con el número de bandas de la imagen, creando N nuevas componentes (o menos) no correladas de acuerdo al eje de variabilidad. En la siguiente tabla (adquirida del artículo) se establece una relación entre material de la escena y su respuesta espectral.

*Tabla 1: características espectrales de agrupaciones minerales inducidas por filtraciones de petróleo en bandas registradas por el sensor ETM+. Fuente: Identifying hydrocarbon leakage induced anomalies using Landsat-7 /ETM+ data processing techniques in the west slope of Songliao basin, China.*

	Band 1	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
Ferrous-iron	Reflect	Reflect	Absorb	Reflect	Absorb
Bleaching of red beds	Reflect	Reflect	Absorb		
Clay mineral and arbonate				Reflect	Absorb

Se eligieron de forma aleatoria cuatro bandas ETM+ para realizar el análisis de componentes principales. Se eligieron aquellas componentes principales (CP) que mostraron un comportamiento espectral mejorado en relación a lo que se quiere cuantificar.

Bandas elegidas 1345 (ACP) / 3 (CP). Mejora relativa para los materiales de la escena con alto contenido en hierro férrico<sup>2</sup> así como para los estratos con alto contenido en óxido de hierro, los cuales aparentan haber sido parcialmente blanqueados. De acuerdo con su comportamiento espectral dichos materiales presentan alta reflectividad en bandas 1,3 y 5 así como absorción en la banda 4. En la siguiente tabla (también tomada de del artículo) se describe la tercer (CP) del ACP en las bandas 1, 3, 4 y 5 del sensor ETM+ perteneciente a la imagen completa y a dos subimágenes.

---

<sup>2</sup> Hierro férrico: El hierro como elemento metálico tiende a desprenderse de electrones para reaccionar químicamente. Cuando un metal pierde electrones se carga positivamente y entonces se le llama " ion". En el caso del hierro las posibilidades son que pierda dos electrones (menor valencia) o tres electrones (mayor valencia). El último recibe el nombre de hierro férrico.

---

Tabla 2: autovectores y autovalores de 1345-CP3. Fuente: *Identifying hydrocarbon leakage induced anomalies using Landsat-7 /ETM+ data processing techniques in the west slope of Songliao basin, China.*

1345-PC3	Whole area	zhalaite	fulaerji
ETM+1	-0.353	-0.247	-0.408
ETM+3	-0.181	-0.169	-0.380
ETM+4	0.868	0.849	0.805
ETM+5	-0.299	-0.435	-0.198
eigenvalue	41.279	19.652	38.706
Information	4.036%	3.309%	5.650%

Como se puede apreciar no existe variación ni en signo ni en magnitud (en gran orden). Los valores en las bandas 1, 3 y 5 (aquellas de signo negativo) y los valores en la banda 4 sugieren que los materiales de la escena con alto contenido en hierro férrico y óxido de hierro parcialmente blanqueado resaltarán como píxeles oscuros en este componente. El tercer componente principal (3CP) cuenta como un pequeño porcentaje respecto de la varianza (la cual se encuentra en un rango de 3.309 a 5.650). Siguiendo la metodología aplicada anteriormente se puede observar como para las bandas 1357-3(CP) y 2357-3(CP) resaltarían los píxeles que provienen de registrar materiales arcillosos y minerales carbonatados. En este caso los materiales que aparecerían más oscuros serían los que tienen mayor contenido en arcilla y minerales carbonatados. Posterior a este análisis se calcula el 4 CP para las bandas 3, 4, 5 y 7. En este caso el valor para la banda 5 (de signo negativo) es bastante alto así como el de la banda 7 (en signo positivo) lo que sugiere que los materiales con contenidos en arcillas y los minerales carbonatados, van a aparecer significativamente oscuros. Estudiando las bandas 3 y 4 se aprecia como los píxeles con alto contenido en hierro férrico y óxidos de hierro “blanqueados” también aparecerían oscuros en la imagen. Como conclusión todos los materiales que sugieren una anomalía por inducción de hidrocarburos quedarían resaltados según píxeles oscurecidos tomando la combinación 3, 4, 5 y 7 de la cuarta componente principal.

Para la obtención de ratios entre diferentes bandas el artículo se apoyó en las siguientes publicaciones: Almeida-Filho y otros, 1999; Tangestani and Moore, 2000; Meer y otros, 2002; Kariuki y otros, 2004. Algunos de los ratios propuestos son los siguientes:  $\frac{3}{1}, \frac{4}{3}, \frac{7}{5}, \frac{2}{3}$  y  $\left(\frac{4}{3} - \frac{2}{3}\right)$ .

En la siguiente tabla se aprecia combinaciones establecidas para mejorar la calidad de la imagen (en cuanto a localizar materiales alterados por inducción de hidrocarburos). Cuando se representaron dichos cálculos mediante falso color aparecieron halos alrededor de los materiales que presentan mayor índice de anomalía por inducción de hidrocarburos.

Tabla 3: agrupación mineral en cuanto a imagen mejorada. Fuente: Identifying hydrocarbon leakage induced anomalies using Landsat-7 /ETM+ data processing techniques in the west slope of Songliao basin, China

mineral assemblage	Enhanced image
Ferrous-iron and bleaching of red beds	1345-PC3, 3/1 4/3, (4/3)-(2/3)
Clay mineral and carbonate	1357-PC3, 7/5 2357-PC3
Ferrous-iron, bleaching of redbeds, clay mineral and carbonate	3457-PC3

### 1.3.2 Obtención de anomalías inducidas por microfiltraciones de petróleo en una región árida (Oeste de China) utilizando Teledetección multiespectral

Este artículo estudia las anomalías inducidas por emanación de hidrocarburos en superficie a través del tratamiento de imágenes capturadas por el sensor ASTER. En la siguiente figura se muestra el área de estudio.

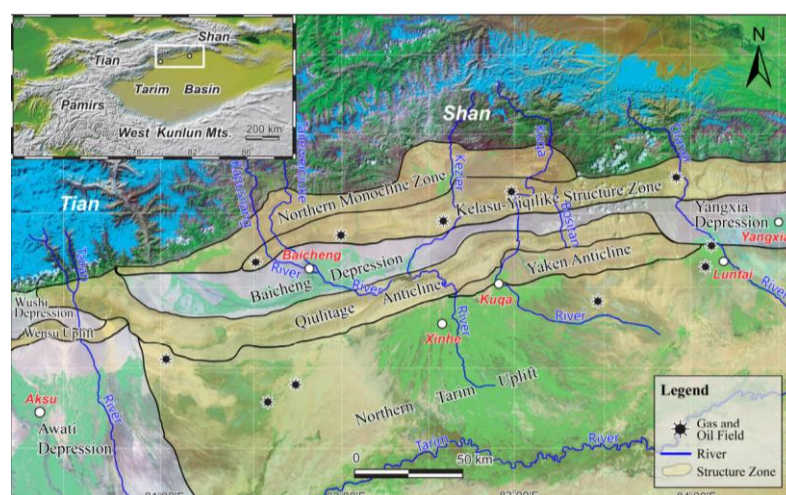


Figura 1: esquema cuenca Kuqa. Fuente: Mapping hydrocarbon seepage-induced anomalies in the arid region, west China using multiespectral remote sensing.

Lo interesante de este artículo es la exposición gráfica de los materiales alterados por hidrocarburos además de utilizar imágenes multiespectrales de un sensor diferente al estudiado anteriormente.

La anomalía inducida por hidrocarburos se produce cuando el petróleo, que escapa de su yacimiento original, genera reacciones de oxidación-reducción. Dicha reacción se produce en el entorno inmediato de la reserva o a lo largo de configuraciones verticales que permiten su filtración, manifestándose en rocas y suelos de la superficie. En la siguiente figura se exponen sendos ejemplos de las anomalías provocadas por la reacción antes mencionada. Estas anomalías

son las que permiten que la Teledetección sea una ciencia con plenas competencias para la labor de exploración.

Las fotografías de la figura 2 pertenecen al área de estudio del anticlinal de Qiulitage. La zona se dividió en: 1. Jidike, núcleo del anticlinal. 2. Kangcun, Kuche, Xiyu, flancos del anticlinal. La secuencia sedimentaria tiene un grosor de unos 4000 m. La estratigrafía en el núcleo del anticlinal queda caracterizada por estratos rojizos intercalados con otros que toman tonos más grisáceos o verdosos. La capa estratigráfica que rodea el núcleo y se encuentra en superficie presenta tonos más amarillentos (Figura 2.c). Las estrías que se pueden apreciar en la figura 2.b, sugieren actividad tectónica. Finalmente en la cresta del anticlinal se encontraron tanto macrofiltraciones (figura 2.f) como acumulaciones de hidrocarburos sobre rocas areniscosas (Figura 2.e).

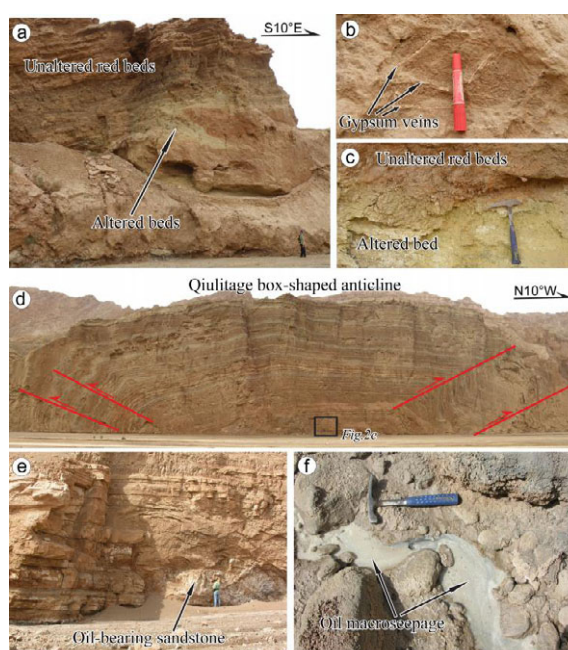
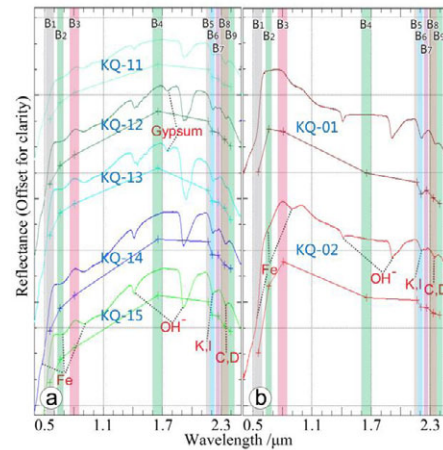


Figura 2: manifestaciones en superficie de anomalías por inducción de hidrocarburos. a) Blanqueamiento de estratos con contenidos de óxido de hierro; b) Conjuntos de venas generalmente de yeso; c) Fotografía de detalle caso a; d) Deformación en pliegue (anticlinal); E) Agrupaciones de petróleo en roca areniscosa; F) Macrofiltraciones en superficie. Fuente: Mapping hydrocarbon seepage-induced anomalies in the arid region, west China using multispectral remote sensing

En cuanto a la medida espectral se realizó una comparación entre materiales alterados y materiales no alterados, así como entre firmas espectrales obtenidas mediante un espectrómetro y un sensor configurado según las capacidades espectrales del satélite ASTER. En la siguiente imagen se adjuntan los resultados obtenidos.





Conclusiones obtenidas según ratios aplicados en imágenes procedentes del satélite ASTER:

- Se puede obtener la distribución de los estratos rojizos no alterados mediante el ratio  $\frac{B2}{B1}$ .
- El contenido en óxido de hierro se puede estimar mediante el ratio espectral:  $\frac{B5}{B4}$ .
- Rocas alteradas tienen un valor relativo alto en la banda 4.
- Se puede extraer información sobre los minerales carbonatados mediante el ratio:  $\frac{B4}{B9}$ .

En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos de utilizar algunos de los ratios establecidos anteriormente.

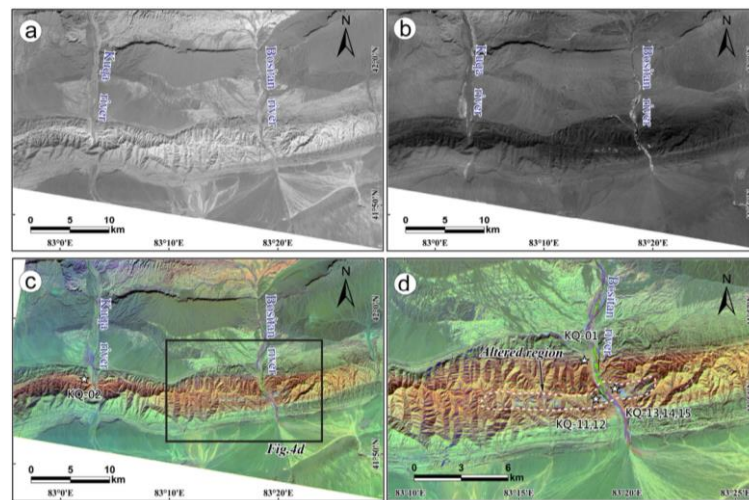


Figura 4: imágenes ASTER de la región de interés. a) Imagen en escala de grises mediante el ratio 2/1; b) Imagen en escala de grises mediante el ratio 4/9; c) Composición falso color con los ratios 2/1(R), 3(G), 4/9(B); d) Imagen c con mayor escala. Fuente: Mapping hydrocarbon seepage-induced anomalies in the arid region, west China using multispectral remote sensing.



### **1.3.3 Detección de la influencia de fugas de gas en vegetación mediante Teledetección hiperespectral**

Se han estudiado dos casos para los sensores multiespectrales. La búsqueda de hidrocarburos no está restringida exclusivamente a este tipo de sensores. Cada vez más se está implementando el análisis del medio físico, con intención de exploración, mediante sensores hiperespectrales ( Yang H., 1999).

En el artículo se asume que cualquier reserva induce alteraciones en su entorno inmediato. Hasta ahora sólo se han estudiado las anomalías producidas sobre rocas y suelos. Este artículo revisa las anomalías que se producen en vegetación estudiando las mismas a través de sensores hiperespectrales. No obstante, sugiere características que se dan en las firmas espectrales de la vegetación que se podrían registrar en algunos sensores multiespectrales.

Las anomalías botánicas se pueden dar a causa de los siguientes factores (Noomen, 2007):

- I. Las filtraciones de hidrocarburos incluyen todos los estados en los que se encuentre el mismo. Los gases que se filtran hasta la superficie desplazan parcialmente el aire que contiene el suelo (donde se incluye el oxígeno que contiene el aire presente en el suelo). En este sentido el suelo contiene una menor cantidad de oxígeno. Además, parte del oxígeno, que aún permanece en el suelo, es usado por bacterias las cuales usan el oxígeno para reducir el metano a dióxido de carbono y agua. Un medio pobre en oxígeno provoca estrés en plantas. Dicho estrés se manifiesta en la correspondiente firma espectral de la planta.
- II. Un ambiente anaerobio cambia el potencial de las reacciones oxidación-reducción además del pH del suelo. Directamente alrededor de la fuga de gas el medio es reducido. A causa de esta reducción la mineralogía del suelo cambia. La solubilidad de macro y micronutrientes cambia, lo que puede provocar una deficiencia o exceso de nutrientes para las plantas.
- III. El crecimiento de las plantas cerca de una fuga de hidrocarburos se manifiesta en su firma espectral. Puede que el gas natural no sea nocivo para las plantas pero las distintas transformaciones químicas que se producen durante su fuga, por ejemplo la obtención de dióxido de carbono durante una de las fases de migración a superficie, resulta tóxico en determinados umbrales. Esto puede causar un envejecimiento de la vegetación o incluso su muerte.

Los tres factores antes mencionados influyen en la firma espectral de la vegetación, pero hay que tener cuidado con el tipo de vegetación que se trate. No todas reaccionan de la misma forma. Kriedemann, 1975 establece una clasificación en función del tipo de fotosíntesis que realice la planta. Dicha clasificación atiende a varios criterios, dentro de los cuales se encuentra el tipo de clima en el que crece la planta.

La reflectividad registrada para vegetación alterada a menudo muestra una mayor reflectividad en la región del visible, una menor reflectividad en el infrarrojo cercano y un cambio en el límite rojo hacia menores longitudes de onda. Para el caso de vegetación alterada por fugas de gas no se identificaron dichos patrones. En algunas investigaciones la reflectividad en el visible e infrarrojo cercano era mayor, mientras que en otras era menor. Se demostró además que el límite rojo cambia hacia longitudes de onda menor, pero Yang (1999) demostró la situación contraria.

Finalmente se establece que la anomalía depende de: 1. Tipo de planta (lo que incluye tipo de fotosíntesis que realiza, relación clorofila/agua que se den en sus hojas, además de otras características) y 2. Tipo de gas así como cantidad (se realizaron experimentos con metano, etano y dióxido de carbono, este último en pequeñas cantidades puede servir como fertilizante);

En la siguiente imagen se puede ver una cubierta vegetal en la que se distinguen zonas de macrofiltración, zonas de influencia y zonas sin influencia de hidrocarburos.



*Figura 5: región de interés. Ventura (U.S.A.). Distinción de macrofiltración (seep), zona afectada por gas y zona no afectada. Fuente: Detecting the Influence of Gas Seepage on Vegetation using Hyperspectral Remote Sensing.*

## 1.5 Fundamentos de la Teledetección

Este apartado tiene como objetivo citar brevemente las leyes físico-matemáticas básicas que rigen la ciencia de la Teledetección. Se considera indispensable la inclusión de este apartado para la aplicación práctica en el tratamiento de imágenes capturadas por sensores remotos.

### 1.5.1 El sensor humano

Para poder comprender el funcionamiento de un sensor se expone a continuación el funcionamiento del sensor humano- el ojo-, para ello se adjunta la figura 6 de las partes que lo componen.

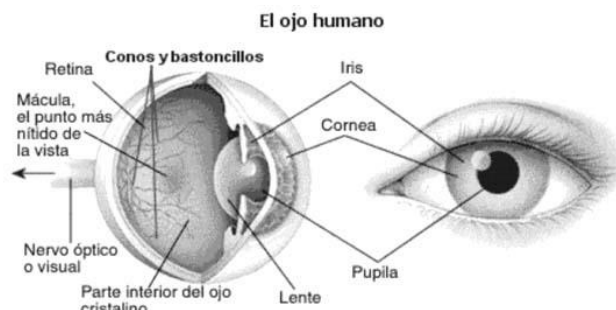


Figura 6: el ojo humano. Fuente: Imagui.

La lente y la córnea forman una imagen en una superficie curva fotosensible denominada retina. La lente humana tiene una focal de 17 mm, lo que permite tener un campo de visión de 180°, aplicando convenientemente leyes de óptica geométrica. Las focales cortas producen el denominado efecto “ojo de pez”, pero gracias a la curvatura de la retina este efecto se compensa.

El funcionamiento es el siguiente. Un diafragma, conocido como iris, se ajusta automáticamente para controlar la cantidad de luz que entra. La abertura del iris por la cual pasa la luz (la pupila) es negra debido a que en ella no se refleja luz y a que muy poca luz se refleja hacia afuera desde el interior del ojo. La retina, que juega el papel de la película en una cámara y que se encuentra en la superficie curva posterior, consiste en un arreglo complejo de nervios y receptores conocidos como bastones (fotoreceptores sensibles al blanco y negro) y conos (fotoreceptores sensibles al color) que transforman la energía luminosa en señales eléctricas que se desplazan por los nervios. La pequeña área del centro de la retina se conoce como fovea; en ella los conos están muy cercanos los unos de los otros, por lo que es ahí donde se forma la imagen más nítida y se logra la mejor discriminación de colores.

A diferencia de un sensor, el ojo no tiene obturador. La operación equivalente es la realizada por el sistema nervioso, el cual analiza las señales para formar imágenes con una rapidez de aproximadamente 30 por segundo. Así consigue generar una sensación de continuidad del entorno observado.

La lente está sujeta por músculos ciliares que regulan su curvatura. Para enfocar un objeto distante, los músculos se relajan y la lente se adelgaza. Para enfocar un objeto cercano, los músculos se contraen, con lo que el centro de la lente se hace más grueso, acortando de este modo la longitud focal.

Existen tres tipos de conos con picos de sensibilidad para las longitudes de onda roja, azul y verde como se puede ver en la figura 7.

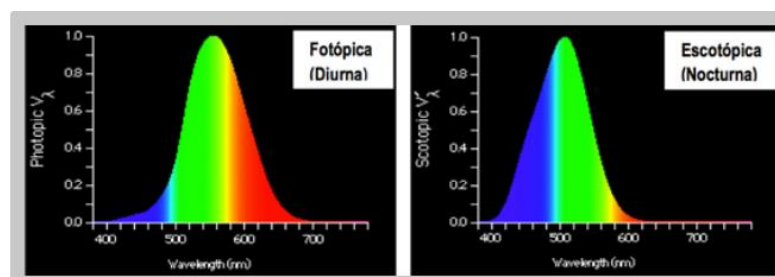


Figura 7: curvas de sensibilidad del ojo humano, fotópica y escotópica. Fuente: Iluminet.

Es importante citar que para una correcta fotointerpretación, las longitudes de onda roja y azul presentan mayor aberración cromática, mientras que, las longitudes de onda amarilla y verde son más fáciles de discriminar.

### 1.5.2 Radiación electromagnética

La radiación electromagnética provoca transiciones entre los niveles de energía cuantizados del sistema material que dan lugar al espectro. En este apartado se pretende exponer brevemente los fundamentos básicos de la radiación electromagnética. Es importante destacar el carácter vectorial de los campos, ya que visualmente no se ha incluido su símbolo correspondiente.

Una carga  $q$  estática crea a su alrededor un campo eléctrico de intensidad  $E$ . Si la carga se mueve- si tenemos corriente eléctrica- entonces se genera, además, un campo magnético de intensidad  $B$ . Si en el seno del campo eléctrico  $E$  creado por la carga  $q$  colocamos una carga  $q'$ , entonces esta sufre una fuerza medible dada por  $F_e = q' \cdot E$ . Si además la carga  $q'$  se mueve con una velocidad  $v$ , sobre ella actúa otra fuerza adicional provocada por el campo magnético generado por  $q$ , definida por  $F_b = q' \cdot v \wedge B$ . La fuerza total será la suma de las dos fuerzas:  $F_t = F_e + F_b = q' \cdot (E + v \wedge B)$  y se denomina fuerza de Lorentz.

Si la carga se mueve aceleradamente entonces se crea a su alrededor un campo electromagnético oscilante que se propaga de forma ondulatoria y que constituye la radiación electromagnética propiamente dicha.

Los campos eléctrico y magnético generados por cualquier distribución de cargas y corrientes se determinan resolviendo las ecuaciones de Maxwell.

Para la descripción de las ecuaciones de Maxwell se tiene que introducir la caracterización de los medios. Si el medio es lineal, homogéneo e isótropo sus propiedades se pueden caracterizar introduciendo tres componentes escalares: conductividad, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética. La conductividad es la medida de la capacidad de un determinado material que deja pasar la corriente eléctrica, su aptitud para dejar circular libremente las cargas eléctricas. La permeabilidad magnética se define como la capacidad de una sustancia o medio para atraer y

hacer pasar a través de ella campos magnéticos. La permitividad eléctrica describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio.

- Primera Ley de Maxwell:

$$\oint E \cdot dS = \frac{q}{\epsilon};$$

La primera ecuación de Maxwell en forma integral indica como el flujo del campo eléctrico  $E$  que atraviesa una superficie cerrada  $S$  en un medio de permitividad  $\epsilon$  es igual a la carga total encerrada dividida por  $\epsilon$  (permitividad eléctrica).

- Segunda Ley de Maxwell:

$$\oint B \cdot dS = 0;$$

La ecuación indica que el flujo magnético sobre una superficie cerrada es siempre igual a cero, lo que significa que el flujo que entra en la superficie cerrada es igual al que sale de la misma. Se puede afirmar que las líneas de inducción son siempre cerradas.

- Tercera Ley de Maxwell:

$$\oint E \cdot dl = - \int_S \left( \frac{dB}{dt} \right) \cdot dS;$$

El primer miembro de la tercera ecuación de Maxwell en forma integral indica que, la fuerza electromotriz se puede definir como la energía cedida por un campo no electrostático (integral curvilínea) por unidad de carga a lo largo de un circuito cerrado; El segundo miembro representa la variación del flujo magnético que atraviesa la superficie  $S$ . De este modo, teniendo en cuenta ambos miembros se puede enunciar la ley de la inducción de Faraday de manera análoga a como él hizo, diciendo: *“la fuerza electromotriz inducida en un circuito estacionario cerrado es igual y de signo contrario a la variación respecto al tiempo del flujo magnético que atraviesa el circuito”*.

- Cuarta ley de Maxwell:

$$\oint H \cdot dl = I + \iint_S \left( \frac{dD}{dt} \right) \cdot dS;$$

Si el desplazamiento eléctrico  $D$  no varía con el tiempo, el segundo miembro de la parte derecha de la ecuación sería igual a cero. Válida solamente para campos estáticos y es conocida como Ley de Ampère. En el caso de que el desplazamiento eléctrico varíe con el tiempo, la Ley de Ampère debe ampliarse para tener en cuenta la contribución al campo magnético de la densidad de corriente de desplazamiento:  $Jd = \frac{dD}{dt}$ . Esta densidad

de corriente es la contribución de Maxwell para hacer compatible la primitiva Ley de Ampère con el principio de continuidad de carga.

Una de las consecuencias más importantes de las ecuaciones de Maxwell fue la predicción de la existencia de las ondas electromagnéticas, antes de que Hertz en 1888 realizara sus experimentos que le llevaron a la comprobación de la existencia de las mismas. Las ondas electromagnéticas consisten en campos eléctricos y magnéticos variables que son solución de las ecuaciones de Maxwell.

En el caso de ondas planas con propagación en una sola dirección (figura 8) las ecuaciones de onda serán:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2};$$
$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2};$$

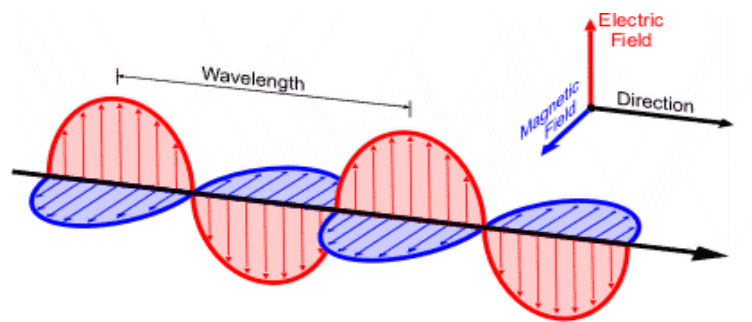


Figura 8: propagación de una onda electromagnética. Fuente: Amanda Mcpherson, UAF.

Se puede comprobar fácilmente que ambas ecuaciones de onda admiten como solución particular,

$$E_x=0, E_y=E, E_z=0;$$

$$B_x=0, B_y=0, B_z=B;$$

Donde E y B son funciones de la posición y del tiempo  $f(x,t)$ .

$$E = E \left( t - \frac{x}{c} \right);$$

$$B = B \left( t - \frac{x}{c} \right);$$

Y si las ondas son armónicas-admiten modelización mediante la función seno o coseno- las ecuaciones resultantes serían las siguientes:

$$E = E_0 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = E_0 \sin 2\pi(\omega t - kx);$$

$$B = B_0 \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = B_0 \sin 2\pi(kx - \omega t);$$

Siendo  $T$  el periodo,  $\nu$  la frecuencia lineal ( $\nu=1/T$ ),  $\lambda$  la longitud de onda,  $\omega$  la frecuencia angular ( $\omega=2\pi/T=2\pi\nu$ ) y  $k$  el número de onda ( $k=2\pi/\lambda$ ).

Las ecuaciones anteriores representan una onda plana polarizada linealmente, con un campo eléctrico  $E$  y un campo magnético  $B$  oscilando en direcciones perpendiculares entre si y perpendiculares a la dirección de propagación.

Las amplitudes  $E_0$  y  $B_0$  no son independientes, están relacionadas por la expresión:

$$E_0 = c B_0, \text{ donde } c \text{ es la velocidad de la luz.}$$

La relación entre amplitudes se conserva para valores instantáneos. Esta ecuación pone de manifiesto que los campos eléctrico y magnético están en fase, es decir que toman valores extremos y nulos al mismo tiempo.

Otra solución de la ecuación de ondas es aquella en la cual los campos eléctrico y magnético tienen una magnitud constante pero rotan alrededor de la dirección de propagación, dando como resultado una onda polarizada circularmente. Las componentes de los campos eléctrico y magnético según dos ejes perpendiculares se expresan entonces por:

$$E_y = E_0 \sin(kx - \omega t); E_z = \pm E_0 \cos(kx - \omega t);$$

$$B_y = B_0 \cos(kx - \omega t); B_z = \pm B_0 \sin(kx - \omega t);$$

Que corresponden a un desfase de  $\pm \frac{\pi}{2}$  entre las componentes de cada campo, siendo el campo magnético perpendicular al campo eléctrico en cada instante. Si las amplitudes de las componentes ortogonales de cada campo son distintas se obtiene la polarización elíptica.

Como conclusión se puede afirmar que las soluciones en forma de onda plana que se han obtenido son completamente generales, y que, las ondas electromagnéticas planas son transversales, con los campos eléctricos  $E$  y magnético  $B$  perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación.

### 1.5.3 Energía de una onda electromagnética

Las ondas electromagnéticas transportan energía. La energía radiante puede venir de múltiples fuentes, por ejemplo del Sol, que es la que mantiene caliente, y sobre todo vivo, al planeta Tierra.

Se considera en primer lugar la energía que almacena el campo electromagnético en una región dada del espacio. Las energías de los campos eléctrico y magnético por unidad de volumen vienen dadas, respectivamente, por:

$$uE = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 ;$$

$$uB = \frac{1}{2\mu_0} B^2;$$

La densidad de energía total del campo electromagnético puede expresarse, entonces:

$$u = \frac{1}{2} \left( \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right);$$

Sabiendo que para cualquier onda electromagnética se demuestra que los valores instantáneos de los campos eléctrico y magnético, en cualquier punto del espacio, están relacionados mediante la expresión  $E=cB$  (citada anteriormente), se demuestra que  $uE=uB$ .

$$c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0};$$

$$uE = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 = \frac{\epsilon_0}{2} c^2 B^2 = \frac{1}{2\mu_0} B^2 = uB;$$

Afirmando que la densidad de energía total de la radiación puede venir dada por:

$$u = \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0};$$

Otro parámetro a destacar de la energía electromagnética es la intensidad, es decir la energía radiante que atraviesa la unidad de superficie por unidad de tiempo. Se considera para ello una sección transversal de superficie  $A$ , perpendicular al haz de radiación (flecha figura 9). La energía radiante que pasa a través de esta sección durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$  es la misma que la que está contenida en el volumen  $V=A \cdot l$ , donde la longitud  $l=c \cdot \Delta t$  es la distancia recorrida por el haz para un determinado incremento de tiempo.

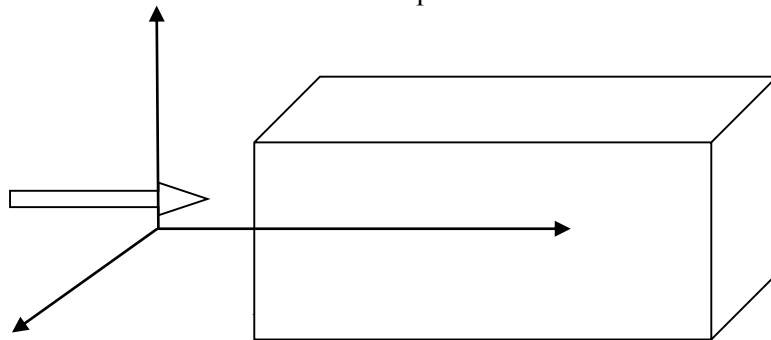


Figura 9: sección transversal que cruza un haz de radiación electromagnética. Fuente: Espectroscopía de Requena y Zúñiga, 2005.

Los vectores  $E$  y  $B$  de la onda electromagnética se mantienen siempre en el mismo plano, perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación. El producto vectorial de los mismos,

---



$E \times B$ , tiene por tanto el módulo resultante como producto del módulo de campo eléctrico por módulo del campo magnético, y apunta en la dirección del flujo de energía, definiendo una fórmula para la intensidad de la siguiente forma:

$$S = c^2 \varepsilon_0 (E \times B);$$

El vector  $S$ , que proporciona tanto el flujo instantáneo de energía radiante por unidad de superficie y tiempo como la dirección en la que produce dicho flujo, se denomina vector de Poynting.

Se puede demostrar que la intensidad fluctúa con el tiempo ( $\partial I / \partial t \neq 0$ ). Normalmente lo que se mide experimentalmente, mediante ensayos de laboratorio, es la intensidad media durante cierto intervalo de tiempo. El promedio en el tiempo del vector de Poynting,  $\langle S \rangle$ , para el haz de ondas planas viene dado por:

$$\langle S \rangle = c \varepsilon_0 |E_{ox}| \left\langle \cos^2 \left( 2\pi vt - \frac{2\pi z}{\lambda} \right) \right\rangle;$$

Siendo y admitiendo demostración:

$$\cos^2 \left( 2\pi vt - \frac{2\pi z}{\lambda} \right) = \frac{1}{2};$$

Obteniendo finalmente la expresión de intensidad:

$$I = \langle S \rangle = \frac{c \varepsilon_0 |E_{ox}|^2}{2};$$

La intensidad media, o simplemente intensidad  $I$  de la radiación que incide sobre una superficie se denomina también irradiancia. A partir de ella se puede calcular la potencia radiante que cruza la superficie multiplicando por el área de la misma. La potencia se mide en vatios (W) y la irradiancia en  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ .

La onda electromagnética plana que se ha considerado hasta ahora no es la única solución que admiten las ecuaciones de Maxwell. Existen también soluciones en forma de ondas electromagnéticas esféricas y cilíndricas, entre otras, y en general superposiciones arbitrarias de cualquiera de estos tipos de ondas, que pueden llegar a generar geometrías complejas.

La expresión de intensidad a la que antes nos hemos referido es perfectamente válida para ondas planas. Si se efectúa el análisis de la intensidad de una onda electromagnética esférica se llega a la *ley de la inversa del cuadrado de la distancia para la irradiancia de una fuente puntual de ondas esféricas*.

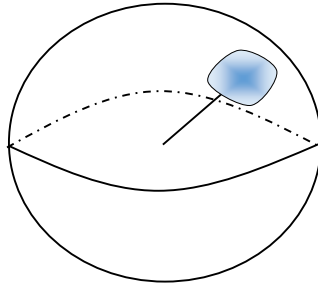


Figura 10: frente de onda esférico con un elemento diferencial de superficie sometido a una intensidad  $I$ . Fuente: Julián Rodríguez.

Se considera un elemento diferencial de superficie (figura 10), el cual se aproxima a un rectángulo infinitesimal.

$$ds = R^2 \cdot d\theta \cdot \text{sen}\theta \cdot d\lambda;$$

Se sabe también que la potencia radiante es igual a:

$$d\omega = I \cdot dS;$$

Como la irradiancia es constante, o medida para un determinado instante, se puede escribir:

$$\int d\omega = I \iint dS;$$

Integrando sobre la superficie esférica:

$$\omega = I \cdot 4\pi r^2;$$

No obstante se tiene que para las ondas esféricas, la amplitud del campo eléctrico depende de la inversa de la distancia:  $E = \frac{A}{r} \cos(\omega t - kz)$ ; la intensidad de las mismas debe depender entonces, de acuerdo con las expresiones anteriores, de la inversa del cuadrado de la distancia.

Para su demostración se recurre a la segunda ley termodinámica de conservación de energía. Se supone un foco emisor de ondas esféricas y se quiere calcular la cantidad de energía por unidad de tiempo que atraviesa una superficie esférica de radio  $r_1$  centrado en el foco. Este flujo o potencia ha sido calculado anteriormente y respondía a la expresión:

$$\omega = I \cdot 4\pi r^2;$$

Donde  $I$  es la intensidad en cualquier punto de la superficie para ese radio ( $r_1$ ), si tomamos otro frente de ondas esférico de diferente radio  $r_2$ , el flujo de energía a través de la nueva superficie debe ser  $I_2 4\pi r_2^2$ ; Igualando ambos flujos obtengo:

$$I = \frac{cte}{r^2};$$

Lo cual responde a la fórmula que se buscaba. Esta es la denominada *ley de la inversa del cuadrado de la distancia para la intensidad o irradiancia de una fuente puntual de ondas esféricas*.

Otro factor que no se ha considerado hasta el momento es que un haz de radiación puede contener ondas de diferentes frecuencias que, en general, interfieren entre sí. El haz puede estar formado incluso por una distribución continua de frecuencias, como ocurre con la radiación térmica. En este último caso la densidad de energía del haz con frecuencias comprendidas entre  $\nu+d\nu$  viene dada por  $u(\nu) d\nu$ , donde  $u(\nu)$  es la densidad de energía espectral. Del mismo modo, la intensidad del haz con frecuencias comprendidas entre  $\nu+d\nu$ , viene dada por  $I(\nu) d\nu$ , donde  $I(\nu)$  es la intensidad espectral. Finalmente, para obtener la densidad de energía total  $u$  y la intensidad  $I$  se han de integrar las correspondientes magnitudes espectrales sobre todo el intervalo de frecuencias, donde matemáticamente tendrían el siguiente aspecto:

$$u = \int_0^{\infty} u(\nu) d\nu; I = \int_0^{\infty} I(\nu) d\nu;$$

### 1.5.4 Cuantificación de la energía. Fotones

La radiación electromagnética manifiesta una dualidad onda-corpúsculo que es característica, en general, de todas las partículas microscópicas. En la descripción corpuscular, el haz de radiación monocromática de frecuencia  $\nu$  está formado por un flujo de partículas llamadas fotones, que transportan cada uno de ellos una energía  $E$  dada por:

$$E = h\nu;$$

Donde  $h$  es la conocida constante de Planck. Los fotones o cuantos de energía se mueven en el vacío a la velocidad  $c$  y tienen una masa en reposo nula. Además de energía, los fotones, y por tanto la radiación electromagnética, transportan momento lineal o cantidad de movimiento – velocidad por masa-. Para cuantificar esa cantidad de movimiento hay que recurrir a consideraciones relativistas, ya que los fotones a la velocidad a la que se mueven, son partículas relativistas puras. Así, la teoría de la relatividad restringida de Einstein establece que la energía de una partícula está relacionada con su cantidad de movimiento según la expresión:

$$E = (m_0^2 c^4 + p^2 c^2)^{\frac{1}{2}};$$

Donde  $m_0$  es la masa en reposo de la partícula. Como el fotón tiene una masa en reposo nula, la expresión anterior se reduce a:

$$E = pc;$$

De donde la cantidad de movimiento ( $p$ ) se puede obtener de:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda};$$

Las ecuaciones que proporcionan la energía y la cantidad de movimiento del fotón en función de las magnitudes ondulatorias de la radiación son:

$$E = h\nu;$$

$$p = \frac{h}{\lambda};$$

Y se denominan ecuaciones de Planck-Einstein.

Antes se ha cuantizado un fotón en función de una constante y de sus magnitudes intrínsecas pero conviene analizar el flujo de fotones. Se considera, en primer lugar, una onda monocromática, una única longitud de onda, de frecuencia  $\nu$  e intensidad  $I$ . El número de fotones asociado a dicha onda, que cruza una unidad de superficie transversal por unidad de tiempo, es la denominada densidad de flujo fotónico  $\Phi$ , y viene dada por la expresión:

$$\Phi = \frac{I}{h\nu};$$

Según la expresión anterior el flujo es directamente proporcional a la intensidad e inversamente proporcional a la frecuencia. Experimentalmente se puede comprobar como para intensidades altas el flujo de fotones describe una apariencia continua, por el contrario si se disminuye la intensidad se manifiesta el carácter corpuscular de la radiación electromagnética. Si la intensidad es constante, el flujo aumenta conforme disminuye la frecuencia. Las manifestaciones corpusculares de la radiación son, pues, más acusadas en el límite de altas frecuencias, y las manifestaciones ondulatorias más fuertes en el límite de bajas frecuencias.

El momento lineal que transporta la radiación electromagnética da lugar a una presión de radiación cuando el haz incide sobre una superficie. Se supone un haz de radiación monocromática de frecuencia  $\nu$  e intensidad  $I$  incidente de forma perpendicular sobre una superficie plana. Si la superficie es totalmente absorbente, la variación de momento lineal que se produce cuando la radiación incide sobre ella es igual al momento lineal que transporta la radiación. La cantidad de momento lineal que llega a un trozo de superficie de área  $A$ , durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , es la misma que contiene un volumen de radiación  $V=AL$ , donde  $L=c\Delta t$  es la distancia recorrida por el haz, es decir  $p\nu AL = p\nu A c\Delta t$ , donde  $p\nu$  es la cantidad de momento lineal por unidad de volumen. La presión  $P$  que ejerce el haz sobre la superficie es (se omite la caracterización vectorial):

$$P = \frac{F}{S};$$

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial(m \cdot v)}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t};$$

Para obtener la expresión de la fuerza incidente se divide entre el intervalo de tiempo:

$$F = \frac{p\nu A c \Delta t}{\Delta t};$$

Dividiendo fuerza entre superficie:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{\frac{p\nu A c \Delta t}{\Delta t}}{A} = \frac{p\nu A c \Delta t}{\Delta t A} = p\nu c;$$

Obteniendo que la presión es igual a la cantidad de movimiento por unidad de volumen por la velocidad de la luz.

Ahora se dejará la presión en función de la intensidad, para ello se ha de definir una serie de conceptos así como repasar otros expuestos anteriormente.

- Momento lineal por fotón:  $p = \frac{h\nu}{c}$  ;
- Momento lineal del haz:  $p_h = N^\circ \text{ fotones} \cdot p$ ;
- Momento lineal por unidad de volumen de un haz:  $p\nu = \frac{N h \nu}{V c}$ , donde  $\frac{N h \nu}{V}$  es la densidad de energía de un haz ( $u$ );
- Se definió la intensidad como densidad de energía por velocidad de la luz:  $I = u c$ ;
- Sabiendo :  $p\nu = \frac{P}{c}$ ,  $p\nu = \frac{u}{c} \rightarrow \frac{P}{c} = \frac{u}{c} \rightarrow P = \frac{u c}{c} = \frac{I}{c}$ ;

Si la superficie sobre la que incide la radiación es totalmente reflectora, la radiación reflejada tiene un momento lineal igual al de la radiación incidente, pero en dirección opuesta. La variación de momento lineal por unidad de volumen es entonces  $2p\nu$  y la presión de radiación es el doble que la de la superficie totalmente absorbente. Como curiosidad se cita que la presión solar – o más conocida como viento solar-, que soporta la tierra es pequeña. La intensidad de luz que llega a la atmósfera es de unos  $1370 \frac{W}{m^2}$ . Suponiendo que se absorbiese toda, la presión solar resultante sería de  $4,7 \cdot 10^{-6} \frac{N}{m^2}$ , mucho menor que la presión atmosférica, que vale aproximadamente  $10^5 N/m^2$ .

### **1.5.5 Análisis de los intervalos del espectro electromagnético que corresponden al visible y al infrarrojo cercano, también denominado como región óptica**

Las ondas electromagnéticas se caracterizan, o están parametrizadas, por su frecuencia o su longitud de onda, y se clasifican en diversos tipos de onda en función de los valores de las mismas. Toda la gama de frecuencias conocidas constituye el denominado espectro electromagnético, y este espectro se divide en diferentes zonas, tal como se muestra en la figura 11, atendiendo a las características más o menos comunes de las radiaciones incluidas en ellas.

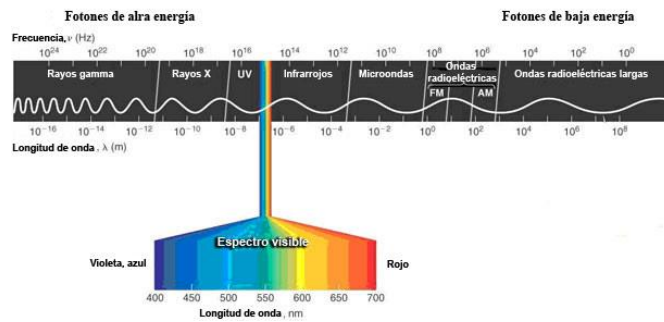


Figura 11: espectro electromagnético. Fuente: Redorbit.

Se expone solo la parte del espectro correspondiente a la región óptica y térmica, porque incluye las partes que se van a analizar para lograr el cometido del trabajo presente.

- Infrarrojo: La región infrarroja se extiende desde aproximadamente  $3 \times 10^{11} \text{ Hz}$  hasta alrededor de  $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$  o en longitudes de onda desde  $1000 \mu\text{m}$  hasta  $0.78 \mu\text{m}$ . Esta región se subdivide a su vez en tres, el infrarrojo cercano, que es la más próxima al visible ( $0.78\text{-}2.5 \mu\text{m}$ ), el infrarrojo medio ( $2.5\text{-}50 \mu\text{m}$ ) y el infrarrojo lejano ( $50\text{-}1000 \mu\text{m}$ ). La radiación infrarroja fue descubierta por William Herschel en 1800 al estudiar el poder calorífico de las diferentes componentes de la luz visible y comprobar qué, más allá del rojo, existía otra radiación no apreciable a la vista que provocaba también un aumento de temperatura. La radiación infrarroja es, de hecho, la que emiten los objetos en forma de calor por el hecho de estar a una temperatura diferente de  $0^\circ \text{ K}$  (si su temperatura no es lo suficientemente elevada como para que irradian también en el visible). Los sensores de infrarrojos se utilizan, por tanto, para captar las diferencias de temperaturas de los objetos fotografiados. La energía de estos fotones va desde  $10^{-3} \text{ eV}$  hasta  $1.7 \text{ eV}$ -el electrón voltio es una unidad de energía que representa la energía cinética que adquiere un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 voltio, equivale a  $1,602176462 \times 10^{-19} \text{ J}$ .
- Luz o espectro visible: Es la radiación a la que son sensibles nuestros ojos, o mejor nuestro sistema óptico, y está comprendida en una estrecha franja del espectro electromagnético que va desde  $3.84 \times 10^{14} \text{ Hz}$  hasta  $7.69 \times 10^{14} \text{ Hz}$  de frecuencia, o, en longitudes de onda, desde  $780 \text{ nm}$  hasta  $390 \text{ nm}$ . Esta franja se subdivide a su vez en diferentes intervalos asociados a los colores que percibimos. Lo que se denomina cotidianamente como luz blanca es una mezcla más o menos uniforme de todos los colores. El sol y las estrellas son fuentes de luz visible, al igual que las lámparas. Esta luz incide sobre los objetos y una parte de ella se absorbe y otra se refleja. El color que aprecia el sentido de la vista es el de la luz reflejada. Un objeto negro es, por tanto, el que absorbe

todas las componentes de la luz y un objeto blanco el que las refleja todas. Los fotones de luz transportan una energía que varía en el intervalo de 1.7 a 3.2 eV.

### 1.5.6 Radiación térmica. Cuerpo negro

La radiación térmica es la radiación que emiten los cuerpos como consecuencia de su calor interno. Se ha observado que la frecuencia de la radiación térmica emitida aumenta con la temperatura. Además de emitir radiación, los cuerpos absorben y reflejan, e incluso también la transmiten si alguna de sus dimensiones es lo suficientemente delgada. De hecho, a temperaturas ordinarias, los cuerpos se ven por la luz que reflejan, no por la que absorben como se explicó en el apartado anterior. Sólo a muy altas temperaturas, más o menos por encima de los 800° K, los cuerpos brillan con luz propia, como el Sol.

La cantidad de energía electromagnética que emite un cuerpo como radiación térmica, por unidad de tiempo y superficie del cuerpo, se denomina excitancia radiante  $M$ . Esta magnitud depende, en general, de la naturaleza del cuerpo, del estado de su superficie y de su temperatura. La radiación térmica tiene, además, una distribución espectral continua, es decir se descompone en un amplio intervalo de frecuencias cuando se le hace pasar por un prisma. Se introduce la excitancia radiante espectral  $M(\nu)$  como la excitancia radiante emitida por un cuerpo entre las frecuencias  $\nu$  y  $\nu + d\nu$ . Cuando se mide esta magnitud se observa que su valor pasa por un máximo, a una temperatura dada, en función de la frecuencia, y que cuando la temperatura aumenta, el máximo se desplaza hacia frecuencias mayores, tal como se observa en la figura 12 para el denominado cuerpo negro que, como se ve a continuación, es el emisor perfecto de radiación, dicha característica va a ser empleada en modelos de corrección atmosférica, además de las calibraciones pre-lanzamiento, y cuanto el sensor está en órbita.

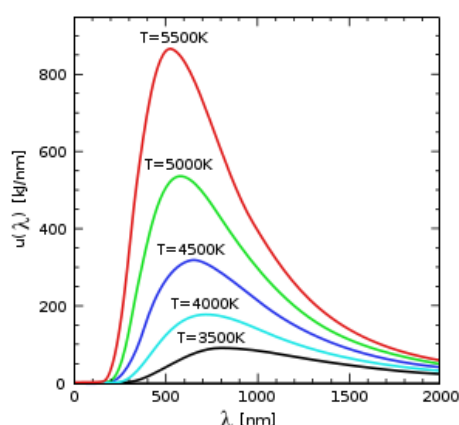


Figura 12: densidad de energía espectral de la radiación del cuerpo negro en función de la longitud de onda.  
Fuente: Escuela de Física Reino Unido.

Como se ha citado en párrafos anteriores, la materia está involucrada tanto en procesos de absorción de energía como de emisión. Se define así un factor de relación denominado coeficiente

de absorción espectral o absorptividad espectral, como la medida de la proporción de energía radiante de frecuencia  $\nu$  procedente del exterior que absorbe el cuerpo:

$$\alpha(\nu) = \frac{M(\nu)}{E(\nu)};$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción espectral,  $M$  es la excitancia espectral o energía térmica radiante emitida por un cuerpo por unidad de tiempo y superficie y  $E$  la cantidad de energía radiante que incide sobre el cuerpo por unidad de tiempo y superficie, donde todas las variables son función de la frecuencia. El valor del coeficiente está acotado entre cero y uno. Cuando  $\alpha(\nu) = 1$ , el cuerpo absorbe toda la energía radiante que le llega.

En ausencia de conducción, convección y demás procesos termodinámicos, se demuestra que en un entorno de  $n$  cuerpos, la intensidad que incide sobre cada cuerpo, debe ser la misma. De otro modo, se generarían gradientes de temperatura (los cuáles se dan sobre la superficie terrestre) que romperían el equilibrio. Siguiendo el principio idealista redactado a principio de párrafo la intensidad debería ser uniforme en cualquier punto y dirección del espacio dentro del entorno aislado- medio homogéneo e isótropo-. Este resultado constituye la denominada ley de Kirchhoff, que establece: *Cuando varios cuerpos que están intercambiando radiación térmica alcanzan la misma temperatura (equilibrio térmico), los cocientes entre sus correspondientes excitancias y absorptividades espectrales son iguales para todos ellos, con independencia de su naturaleza*. Este cociente, por tanto, es una intensidad universal,  $E(\nu, T)$ , que sólo depende de la temperatura y de la frecuencia de la radiación.

Si uno de los cuerpos introducidos en la cavidad tiene absorptividad unidad  $\alpha(\nu) = 1$ , entonces se cumple para el mismo  $M(\nu) = E(\nu)$ , es decir, su excitancia es igual a la intensidad de la radiación en el interior de la cavidad. Toda la energía radiante que incide sobre este cuerpo es, por tanto, absorbida y reemitida como radiación térmica. Puesto que el cuerpo no refleja radiación alguna su color es negro, si no emite térmicamente luz visible. Este cuerpo perfectamente absorbente, y a su vez emisor ideal de radiación térmica, es el denominado cuerpo negro, y la radiación que emite, coincide con la del interior del entorno definido, cuyo carácter general pone de manifiesto la ley de Kirchhoff.

Cuando se analiza experimentalmente la radiación del cuerpo negro, se observa, en primer lugar, que la intensidad total emitida,  $E(T)$ , es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura. Esta es la ley de Stefan-Boltzmann- Josef Stefan la propuso empíricamente en el año 1879 y Ludwig Boltzmann la dedujo teóricamente algo más tarde, en 1884-, que puede expresarse de la siguiente manera:

$$E(T) = \sigma T^4;$$



Donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann, que vale  $5.6703 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ . En segundo lugar, la longitud de onda,  $\lambda_{\text{ma},x}$ , a la que se alcanza la intensidad máxima de radiación es inversamente proporcional a la temperatura. Esta es la ley de desplazamiento de Wien-Formulada por Wilhelm Wien en 1893-que se escribe de la forma:

$$\lambda \max T = C ;$$

Donde C es una constante cuyo valor experimental es  $2.898 \times 10^{-3} \text{ m K}$ . Esta ley es la que responde a fenómenos que se dan como el calentamiento de una barra de hierro, relacionando el aumento de temperatura, la parte de radiación térmica más intensa se desplace hacia longitudes de onda más cortas, o frecuencias más elevadas.

## **1.6 Fundamentos de los hidrocarburos**

Este apartado pretender establecer los fundamentos básicos de los hidrocarburos. Se analizará: génesis, mecanismos de filtraciones y características espectrales de materiales con presencia de hidrocarburos.

### **1.6.1 Definiciones básicas y teorías acerca de su formación**

La etimología de la palabra petróleo, petro: roca-oleum: aceite, admite traducción cómo aceite de roca. Dicho aceite proviene de las distintas combinaciones que se den entre el hidrógeno (H) y el carbono (C). De ahí proviene el nombre de hidrocarburos. El estado de los hidrocarburos puede ser: gaseoso, líquido (en estos estados suele encontrarse en el subsuelo), semisólidos y sólidos (como aparecen en muchos sitios de la superficie terrestre). El ser humano se percató de la existencia del petróleo desde hace mucho tiempo gracias a su manifestación en superficie. Dicha manifestación se produce por una actividad geológica importante (configuración estructural, sistema de fallas, etc.). Muchas emanaciones fueron, o son todavía, muy intensas. En las riberas del mar Muerto eran tan abundantes que los romanos las designaron como Lacus Asfaltitus (Barberii, 1996).

El origen del petróleo se desconoce con exactitud. Las siguientes teorías podrían explicar su génesis:

- Teorías inorgánicas: Según estas teorías el petróleo se forma por reacciones puramente químicas (sin la participación de agentes vegetales). Dentro de las teorías inorgánicas se encuentra la teoría del carburo; dicha teoría enuncia que, mediante experimentación en laboratorio, se demostró que carburos de calcio, hierro y otros elementos en presencia de agua producían hidrocarburos (en el sentido de enlace entre C-H). Esta teoría tuvo, o tiene, sus más acendrados defensores entre los químicos, pero no es aceptado por la gran mayoría de los geólogos. Otra teoría en la misma línea de la anterior es, la teoría a base de carbonato de calcio, sulfato de calcio y agua caliente: los compuestos  $\text{Ca CO}_3$  y  $\text{Ca}$

SO<sub>4</sub>. 2 (H<sub>2</sub>O), de gran abundancia y asociación en la naturaleza, eran capaces de producir los constituyentes del petróleo en presencia de agua caliente.

- Teorías orgánicas: Se basan en la participación de residuos vegetales o de animales en el proceso químico de descomposición. Dentro de las teorías orgánicas se encuentra la Teoría Vegetal y la Teoría del Carbón. Teoría Vegetal: Aporte significativo de algas y otras plantas marinas en costas, mares y océanos que tras un proceso adecuado representa suficiente material para formar petróleo. Por otro lado las plantas terrestres son tan abundantes en las bahías cerradas, lagunas y pantanos que tienen todo el potencial para transformarse en petróleo. Teoría del Carbón: Se demostró en laboratorio que por medio de destilación de tipos de carbón lignítico y bituminoso se obtienen hidrocarburos equivalentes a los componentes del petróleo.

Síntesis de teorías y conclusiones de los trabajos de campo realizados (Barberii, 1996):

- I. La descomposición de la materia animal y/o vegetal depositada y enterrada en los estratos geológicos, sufre alteraciones por la acción de: microorganismos bacterianos, presión y temperaturas.
- II. El material graso y ceroso (kerógeno) que se deriva de la descomposición de plantas y animales puede ser la fuente de la generación de acumulaciones petrolíferas en los estratos sedimentarios. Estratos de lutita, ricos en kerógenos, se encuentran en muchas partes del mundo.
- III. Generalmente todas las rocas de las formaciones de los campos petroleros contienen fósiles. Algunos estudios microscópicos de estas rocas señalan gran abundancia de plancton, es decir, animales y plantas que abundan en el mar.

### **1.6.2 Modelos de formación de filtraciones**

Existen diversos materiales (petróleo, agua, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, etc.) que tienden a filtrarse desde su depósito original hacia la superficie. Las filtraciones de hidrocarburos pueden suceder tanto en tierra como fuera de ella (*offshore*). Los mecanismos de fuga se pueden asociar a configuraciones estratigráficas o estructurales. Desde el punto de vista estructural (figura 13) los agentes que favorecen la creación de mecanismos de filtración se encuentran en la tectónica de placas. Desde el punto de vista estratigráfico las filtraciones, así como la reserva origen de la que emigra, se pueden encontrar en sitios particulares que facilitan su movimiento (figura 14).

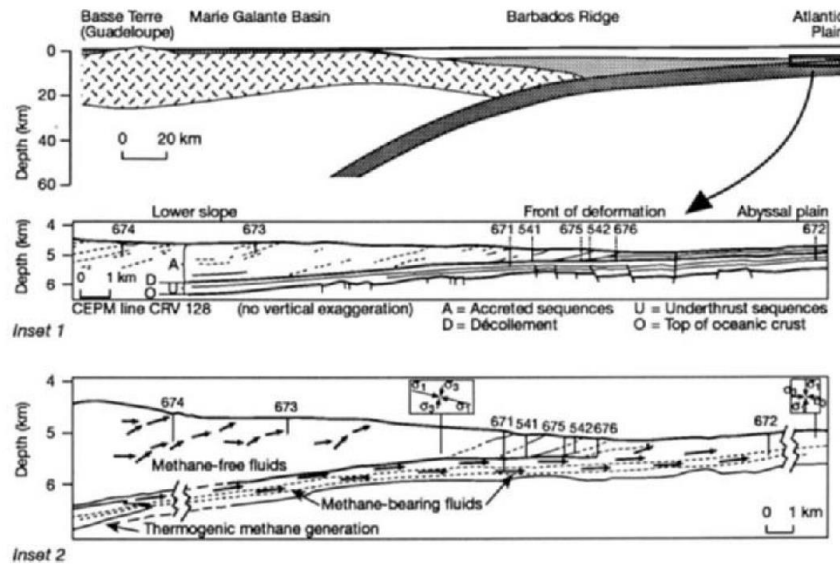


Figura 13: mecanismos de filtración (inset 2) por tectónica de placas. Localización: Barbados, isla del Caribe perteneciente a las Pequeñas Antillas. Corteza del Océano Atlántico subduce ante la placa del Caribe (placa continental). Fuente: Moore y otros 1988, *Geological Society of America Bulletin*.

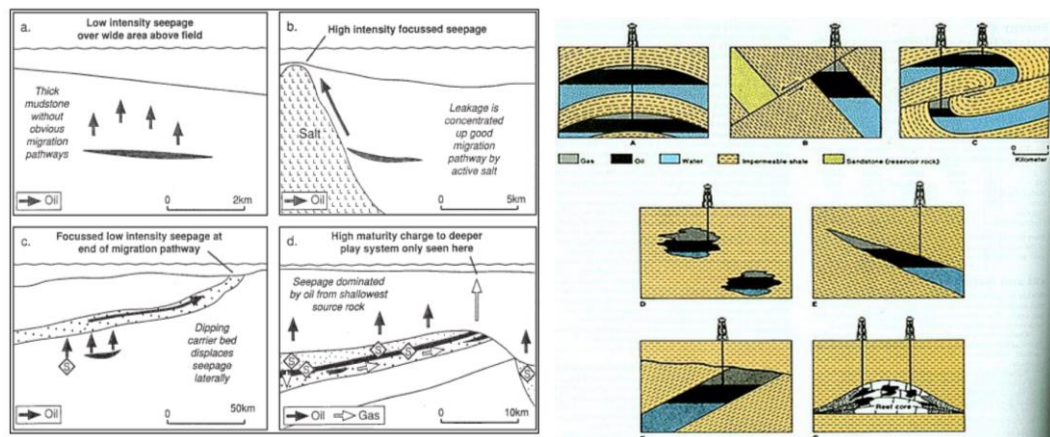


Figura 14: filtraciones debido a estratigrafía. Fuente: Schumacher, D., 1996, *Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments y Physical Geology*, Mcgeary y Plummer.

Como se puede observar existen dos enfoques para entender la génesis de los mecanismos de fuga de los hidrocarburos. Como se estudió en el estado del arte de la presente sección, estas filtraciones producen anomalías en el entorno próximo. Otras reacciones se pueden apreciar en la figura 15. El tema de las filtraciones en pequeña y gran escala es estudiado en profundidad por las referencias (J.M. Verweij, 1993) y (Dijkers, 1985).

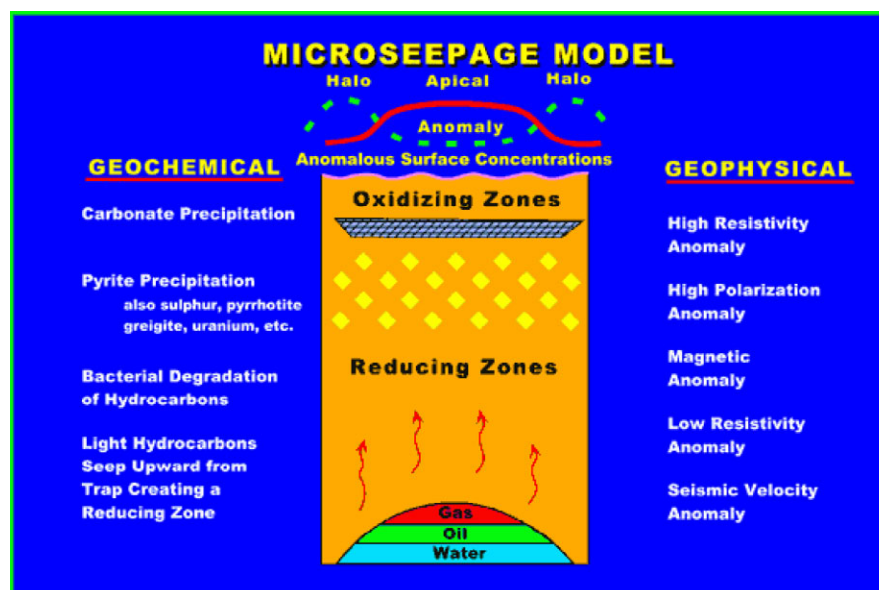


Figura 15: modelo de filtraciones y anomalías registradas para algunos campos físicos además de algunas reacciones químicas. Fuente: Schumacher, D., 1996.

### 1.6.3 Análisis de la firma espectral de materiales con contenidos de hidrocarburos

Estudios (Cloutis, 1989; Kühn, 1996; Hörig, 2001 y otros) encontraron que los materiales con suficiente cantidad de hidrocarburos presentan absorción en su respectiva firma espectral para los valores 1.73  $\mu\text{m}$  y 2.31  $\mu\text{m}$ . Algunos investigadores preferían utilizar el valor de 2.31  $\mu\text{m}$  puesto que el valor 1.73  $\mu\text{m}$  es próximo a un extremo relativo de absorción en la firma espectral del agua. Hörig y colaboradores demostraron el potencial del valor 1.73  $\mu\text{m}$  para la detección de hidrocarburos, es decir, las variaciones que presenta una firma espectral, de un determinado material, por contener hidrocarburos. El trabajo realizado por Hörig y Kühn está avalado por un dedicado trabajo de campo además de verificar con dos tipos de espectrómetros. La forma en la que se realizó el trabajo se encuentra en (Hörig B., Kühn F., Oschütz F. & Lehmann F., 2001). Dado el potencial que tiene este fenómeno de absorción que se produce en materiales con presencia de hidrocarburos, se ha desarrollado un índice de hidrocarburos para su localización.

Mediante este índice de hidrocarburos se pretende crear una imagen en la que sus píxeles aparezcan resaltados en el caso en el que el mismo pertenezca a zonas en las que existan materiales que hayan podido tener contacto, o lo tengan, con hidrocarburos. Como se puede observar hasta el momento no se ha hecho distinción entre el tipo de hidrocarburo.

En la figura 16 se puede apreciar la influencia en la firma espectral de algunos materiales que se encuentran en contacto con hidrocarburos. Dicha figura se adjunta de la investigación de

Hörig y colaboradores en 2001. Pertenece a la fase de reconocimiento de campo con espectrómetro.

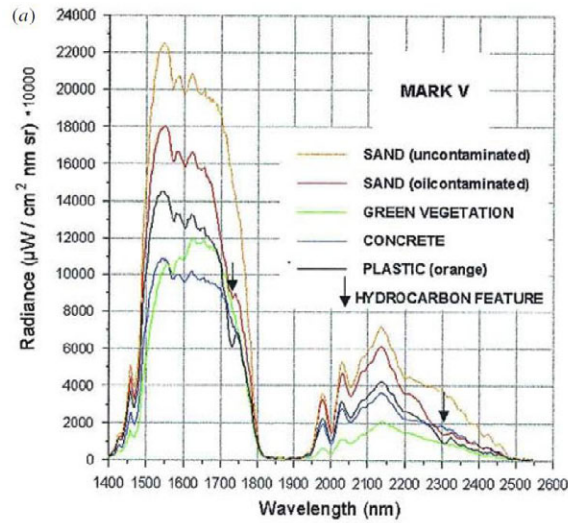


Figura 16: muestras en contacto con hidrocarburos registradas con el espectrómetro MARK V. Fuente: Hörig y otros 2001.

Sabiendo que la absorción se produce para el valor de longitud de onda igual a  $1.73 \mu\text{m}$  se aumenta el detalle en un zum apreciable en la siguiente figura:

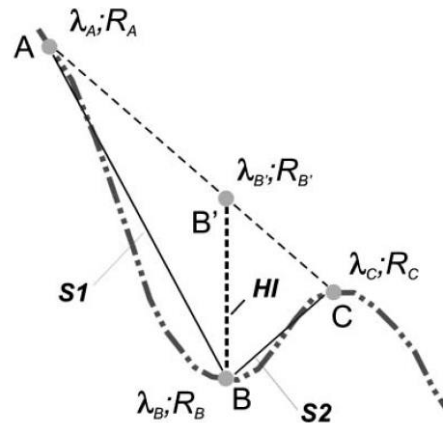


Figura 17: zum de la absorción ( $1.73 \mu$ ) que produce la firma espectral de un material en presencia de hidrocarburo. Fuente: Kühn y otros 2004.

Los puntos A, C corresponden a puntos singulares inmediatos al mínimo en donde se produce la absorción (B). En definitiva se buscan puntos que tengan un significado espectral y que admitan modelización matemática. La fórmula correspondiente a la figura anterior es:

$$HI = (\lambda_B - \lambda_A) \frac{R_C - R_A}{\lambda_C - \lambda_A} + R_A - R_B$$

En las publicaciones de Kühn y Hörig se asignan valores para programas en tierra (MARK V) y para un vuelo en el que se utilizó el sensor HYMAP. En la publicación de Tian (2012) se utilizaron los siguientes valores para el sensor hiperespectral Hyperion:  $\lambda_A$ : longitud de onda de la banda 155, 1699.3997 nm;  $\lambda_B$ : longitud de onda de la banda 158, 1729.6958 nm;  $\lambda_C$ : longitud

de onda de la banda 160, 1749.7928 nm;  $R_A$ : reflectividad relativa de la banda 155;  $R_B$ : reflectividad relativa de la banda 158 y  $R_C$ : reflectividad relativa de la banda 160.

Considerando este mínimo relativo se puede crear un algoritmo para la detección directa tal y como se ha hecho con otros parámetros biofísicos (por ejemplo el NDVI). El algoritmo fundamentalmente hará una transformación de un sistema multibanda en un sistema monobanda donde se aprecie la presencia del hidrocarburo. El algoritmo debe, además de incluir la ecuación presentada anteriormente, considerar la forma en la que representa el píxel que sugiere presencia de hidrocarburos puesto que es una característica de muy baja energía.

Otra posible combinación de valores es la propuesta por The Geosat Committee Inc. En la figura 18 se pueden apreciar distintas curvas espectrales para materiales con relevante cantidad de hidrocarburos, así como una índice para su localización directa.

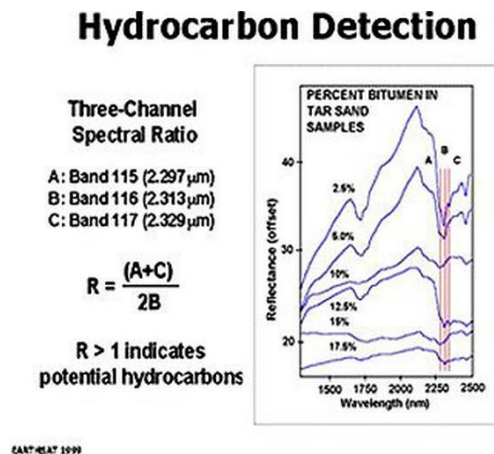


Figura 18: firmas espectrales para arenas con distintos porcentajes de materiales bituminosos. Fuente: The Geosat Committee.

Lo descrito anteriormente encaja para todos los hidrocarburos. Dentro de los distintos enlaces H-C, estudios (Cloutis, 1989; Ellis y Davis, 2000) sugieren firmas espectrales para materiales específicos.

En el trabajo de Cloutis se examinan con detenimiento las arenas bituminosas<sup>3</sup> y su comportamiento espectral. Algunas conclusiones de su artículo pueden ser:

- I. El análisis espectral de arenas con distintas proporciones de bitumen permiten establecer patrones de búsqueda de hidrocarburos que se fugan desde su reserva hacia la superficie. Este análisis es posible porque el contenido de H-C que se da en las arenas bituminosas también se da en las formaciones que tienen lugar en la superficie.

<sup>3</sup> Arenas Bituminosas: Se trata de una mezcla entre: arcillas, bitumen (betunes y alquitranes), cuarzo, agua y otros minerales.

II. El grupo con bajo contenido en bitumen es caracterizado por bandas de absorción prominentes debido a las arcillas y al contenido en agua. Dichas bandas son: 1.4, 1.9, 2.2  $\mu\text{m}$ . Las bandas de absorción del bitumen son débiles, o inapreciables, a pesar de la estructura y color del mismo. Existe una evidencia de la influencia indirecta del bitumen que se muestra en la baja reflectividad (general) de la muestra que no es propia de las arcillas. La figura 19 muestra la firma espectral obtenida.

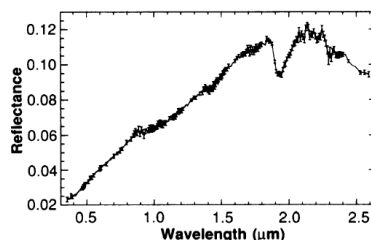


Figura 19: firma espectral arenas bituminosas con bajo contenido en bitumen. Fuente: Cloutis, 1989.

III. El espectro obtenido con muestras con contenido medio de bitumen (figura 20) tiene las siguientes características: 1. La profundidad del mínimo para la longitud de onda de 1.9  $\mu\text{m}$  se ve reducido. 2. Aparece una nueva banda de absorción para la longitud de onda 1.7  $\mu\text{m}$ . La profundidad de la banda 2.3-2.6  $\mu\text{m}$  aumenta. La pendiente de la reflectividad general es ligeramente positiva, esto sirve como indicador de la presencia del bitumen.

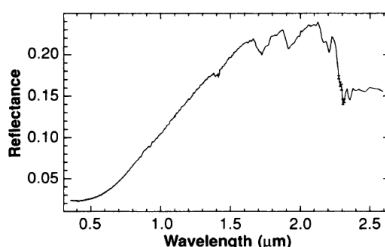


Figura 20: firma espectral arenas bituminosas con contenido medio en bitumen. Fuente: Cloutis, 1989.

IV. Del espectro obtenido con muestras con alto contenido de bitumen (figura 21) se infiere: La mayoría de las bandas de absorción se atribuye a los enlaces C-H. Ausencia de las bandas de absorción correspondientes a los valores 1.4 y 1.9  $\mu\text{m}$ . La absorción en la banda de 1.7  $\mu\text{m}$  es muy prominente. La absorción es fuerte en el rango 2.3-2.6  $\mu\text{m}$ , además de tener pendiente positiva (ninguno de los dos fenómenos es típico en la firma espectral teórica de la arcilla utilizada en la experimentación).



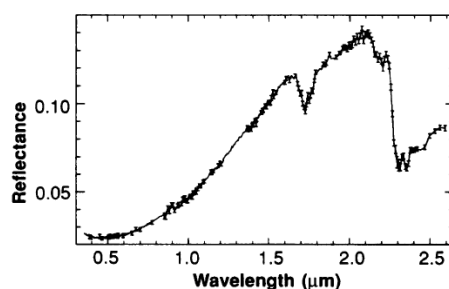


Figura 21: firma espectral arenas bituminosas con alto contenido en bitumen. Fuente: Cloutis, 1989.

V. Se establecen las siguientes relaciones entre firmas espectrales: Bitumen y arcillas se encuentran inversamente correladas. Bitumen y cantidad de cuarzo se encuentran positivamente correladas. La banda que se encuentra en 1.9  $\mu\text{m}$  ayuda a determinar el ratio agua/arcilla.

Conclusión: Las regiones 1.7 y 2.3-2.6  $\mu\text{m}$  son las mejores bandas para la detección de materiales con presencia de enlaces entre hidrógeno y carbono. Como existe diversidad de firmas en relación al contenido y a la disposición de los materiales se está creando un proyecto que incluye gran variedad de firmas espectrales, una biblioteca espectral. Dicho proyecto está avalado e incentivado por The Geosat Committee. En la figura 22 se puede apreciar la forma que tiene dicha biblioteca.

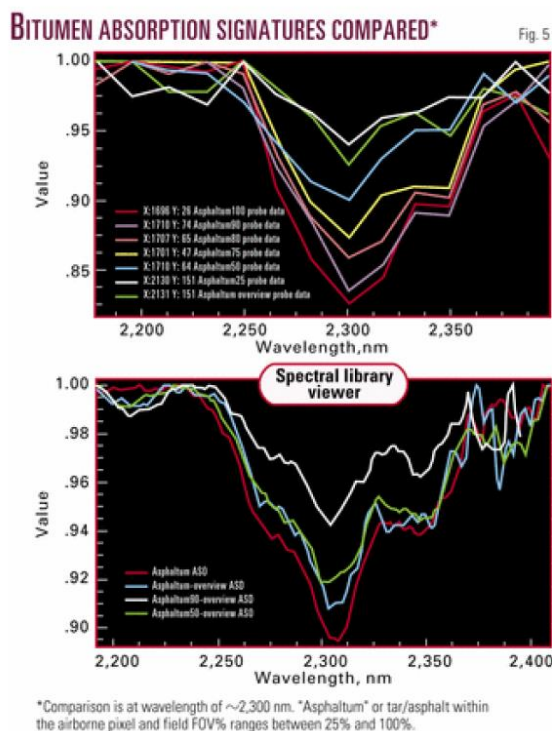


Figura 22: biblioteca espectral con firmas de diferentes tipos de materiales con presencia de hidrocarburos. Fuente: Davis y Ellis 2000.



## CAPÍTULO II. MATERIALES

Dependiendo de la literatura existe distinta clasificación para los sensores. Hay quien considera la siguiente clasificación: monoespectrales (o pancromático), multispectrales e hiperspectrales. Por otro lado, también se encontró la siguiente clasificación (en función del número de bandas): pancromático ( $=1$ ), multispectral ( $>1$ ), superespectral ( $>10$ ), e hiperspectral ( $>100$ ). Para este Trabajo Fin de Grado se considera como sensor hiperspectral aquel que realiza un registro en más de 10 bandas.

Dentro de los programas espaciales se puede ver que no todos los sensores tienen un mismo cometido; es más, para cada misión los programas espaciales tienen sensores cada vez más específicos. En cuanto a los objetivos establecidos para el actual Trabajo Fin de Grado se estudiarán los sensores multispectrales e hiperspectrales.

Para seleccionar los programas adecuados se debe atender a la relación existente entre la resolución espacial y la resolución espectral. Normalmente, dependiendo del proyecto, hay que priorizar sobre alguna de estas características. Dado que existen organismos que proveen imágenes que pertenecen a programas espaciales con buena resolución espacial y otros con buena resolución espectral, si se utilizan ambos, se compensan las fortalezas de uno con las debilidades del otro. No obstante, a continuación se establecen algunas diferencias que se consideran significativas.

En la figura 23 se muestra la diferencia entre el número de bandas en las que registra un sensor multispectral frente a un sensor hiperspectral.

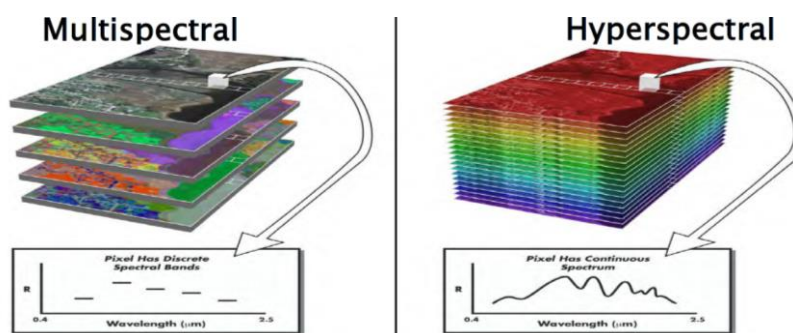


Figura 23: resolución espectral en sensores multispectrales e hiperspectrales. Fuente: Merrick & Company.

Como se puede ver el sensor multispectral registra en un número de bandas reducido si se compara con el número de bandas en el que es capaz de registrar un sensor hiperspectral. Esto se traduce en firmas espectrales más finas, o continuas, para los sensores hiperspectrales. Dichas firmas espectrales más finas sugieren funciones continuas y derivables; lo que no sucede con las firmas espectrales obtenidas mediante un sensor multispectral, las cuales sugieren funciones discretas. Además, el ancho de banda para los sensores multispectrales es de tal magnitud que gran parte de las características físico-químicas de la escena pasan inadvertidas. Por otro lado,

normalmente, la resolución espacial de los sensores multiespectrales es mayor que la de los sensores hiperspectrales. Esto se traduce en una mayor cobertura de la escena así como una mejor interpretación de los objetos (en cuanto a forma) que componen la misma. En la figura 24 se puede ver un ejemplo de las ventajas y desventajas de ambos tipos de sensores.

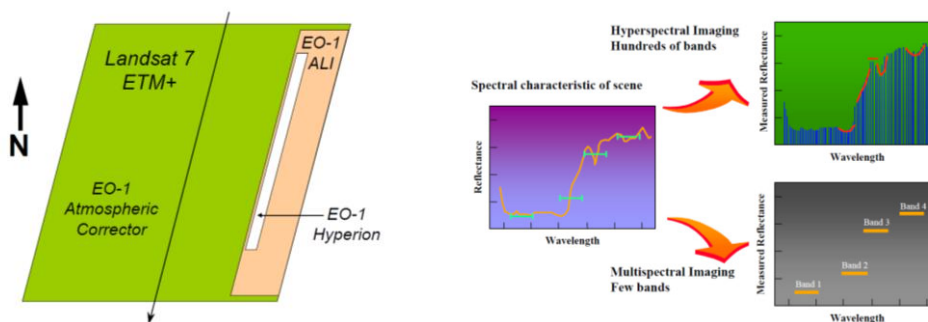


Figura 24: resolución espacial VS resolución espectral. Fuente: NASA.

Para el actual proyecto se utilizan imágenes procedentes de sensores multiespectrales para caracterizar la escena en rasgos generales (buscando anomalías inducidas por la presencia de hidrocarburos). Se utilizarán imágenes capturadas por sensores hiperspectrales para el cálculo del índice de hidrocarburos en zonas próximas al área de interés donde estudios recientes sugieren posibles fugas (Etiope, 2009).

## 2.1 Características sensor e imagen multiespectral

Las imágenes multiespectrales que se van a utilizar en el actual proyecto provienen de los programas espaciales Landsat-4, Landsat-7, Landsat-8 y EOS. A continuación se describen los datos fundamentales de cada programa espacial.

Sensores *Multispectral* (MSS) y *Thematic Mapper* (TM) a bordo del satélite Landsat-4: el satélite se lanzó por la NASA el día 16 de julio de 1982 en la base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California. Resolución radiométrica: 8 bit (256 niveles de intensidad). Sistema de Referencia: *Worldwide Reference System-2 (WRS-2) path/row system*. Tipo de órbita y frecuencia: circular sincronizada con el Sol, próxima a la órbita polar a una altitud de 705 km, inclinación de 98.2°, circunda a la Tierra cada 99 minutos y completa un ciclo a los 16 días; Pasa por el Ecuador a las 9:45 a.m.  $\pm$  15 min. Tipo de sensor: *whiskbroom*. Tamaño de la escena: 170 km x 185 km. La resolución espacial del sensor MSS es de 57 x 79 m para todas las bandas mientras que para el sensor TM es de 30 m en la región óptica y de 120 m en la región térmica. En la siguiente tabla se adjuntan los dominios espectrales asociados a cada banda.

Tabla 4: características espectrales sensor MSS a bordo del satélite Landsat-4.

Bandas sensor MSS	Dominio espectral	Región espectro EM
B4	0.5 - 0.6 $\mu\text{m}$	Visible
B5	0.6 - 0.7 $\mu\text{m}$	Visible
B6	0.7 - 0.8 $\mu\text{m}$	Infrarrojo próximo
B7	0.8 - 1.1 $\mu\text{m}$	Infrarrojo próximo

Tabla 5: características espectrales sensor TM a bordo del satélite Landsat-4.

Banda sensor TM	Dominio espectral	Región espectro EM
B1	0.45 - 0.52 $\mu\text{m}$	Visible
B2	0.52 - 0.60 $\mu\text{m}$	Visible
B3	0.63 - 0.69 $\mu\text{m}$	Visible
B4	0.76 - 0.90 $\mu\text{m}$	Infrarrojo próximo
B5	1.55 - 1.75 $\mu\text{m}$	Infrarrojo próximo
B6	10.40 - 12.50 $\mu\text{m}$	Infrarrojo térmico
B7	2.08 - 2.35 $\mu\text{m}$	Infrarrojo medio

Características específicas de la escena (utilizada en el presente Trabajo Fin de Grado) capturada por el sensor TM a bordo del satélite Landsat-4:

- Sistema de referencia y proyección asociada: WGS-84, UTM 30 N.
- Densidad de nubes: 0%.
- Acimut del Sol para el instante de registro: 133.376466°.
- Elevación del Sol para el instante de registro: 52.754388°.
- Fecha y hora de registro: 1989-08-15; 10:34:26.

Sensor *Enhanced Thematic Mapper* (ETM+) a bordo del satélite Landsat-7: el satélite se lanzó por la NASA el día 15 de abril de 1999 en la base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California. Resolución radiométrica: 8 bit (256 niveles de intensidad). Sistema de Referencia: *Worldwide Reference System-2 (WRS-2) path/row system*. Tipo de órbita y frecuencia: circular sincronizada con el Sol, próxima a la órbita polar a una altitud de 705 km, inclinación de 98.2°, circunda a la Tierra cada 98.99 minutos y completa un ciclo a los 16 días; pasa por el Ecuador a las 10:00 a.m.  $\pm$  15 min. Tipo de sensor: *whiskbroom*. Tamaño de la escena: 170 km x 185 km. La resolución espacial es de 30 m en la región óptica, 15 m en pancromático y 60 m en térmico. En la siguiente tabla se adjuntan los dominios espectrales asociados a cada banda:

Tabla 6: características espectrales sensor ETM+ a bordo del satélite Landsat-7.

Banda sensor ETM+	Dominio espectral	Región espectro EM
B1	0.45 - 0.52 $\mu\text{m}$	Visible
B2	0.52 - 0.60 $\mu\text{m}$	Visible
B3	0.63 - 0.69 $\mu\text{m}$	Visible
B4	0.77 - 0.90 $\mu\text{m}$	Infrarrojo próximo
B5	1.55 - 1.75 $\mu\text{m}$	Infrarrojo próximo
B6	10.40 - 12.50 $\mu\text{m}$	Infrarrojo térmico
B7	2.08 - 2.35 $\mu\text{m}$	Infrarrojo medio
B8	0.52 - 0.90 $\mu\text{m}$	Visible

Características específicas de la escena (utilizada en el presente Trabajo Fin de Grado) capturada por el sensor ETM+ a bordo del satélite Landsat-7:

- Sistema de referencia y proyección asociada: WGS-84, UTM 30 N.
- Densidad de nubes: 9%.
- Acimut del Sol para el instante de registro: 132.651434°.
- Elevación del Sol para el instante de registro: 58.752166°.
- Fecha y hora de registro: 2002-07-27; 10:43:02.

Sensor Operational Land Imager (OLI) a bordo del satélite Landsat-8: el satélite se lanzó por la NASA el día 11 de febrero de 2013 en la base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California. Resolución radiométrica: 8 bit (256 niveles de intensidad). Sistema de Referencia: *Worldwide Reference System-2 (WRS-2) path/row system*. Tipo de órbita y frecuencia: circular sincronizada con el Sol, próxima a la órbita polar a una altitud de 705 km, inclinación de 98.2°, circunda a la Tierra cada 98.99 minutos y completa un ciclo a los 16 días; pasa por el Ecuador a las 10:00 a.m.  $\pm$  15 min. Tipo de sensor: *pushbroom*. Tamaño de la escena: 170 km x 185 km. La resolución espacial es de 30 m en la región óptica, 15 m en pancromático y 100 m en infrarrojo térmico (sensor nombrado como *Thermal Infrared Sensor*). En la siguiente tabla se adjuntan los dominios espectrales asociados a cada banda.

Tabla 7: características espectrales sensor OLI a bordo del satélite Landsat-8.

Banda sensor OLI	Dominio espectral	Región del Espectro EM
1	0.433–0.453 $\mu\text{m}$	Visible
2	0.450–0.515 $\mu\text{m}$	Visible
3	0.525–0.600 $\mu\text{m}$	Visible
4	0.630–0.680 $\mu\text{m}$	Visible
5	0.845–0.885 $\mu\text{m}$	Infrarrojo próximo
6	1.560–1.660 $\mu\text{m}$	Infrarrojo medio
7	2.100–2.300 $\mu\text{m}$	Infrarrojo medio
8	0.500–0.680 $\mu\text{m}$	Visible
9	1.360–1.390 $\mu\text{m}$	Infrarrojo próximo
10	10.6–11.2 $\mu\text{m}$	Infrarrojo térmico
11	11.5–12.5 $\mu\text{m}$	Infrarrojo térmico

Características específicas de la escena (utilizada en el presente Trabajo Fin de Grado) capturada por el sensor OLI a bordo del satélite Landsat-8:

- Sistema de referencia y proyección asociada: WGS-84, UTM 30 N.
- Densidad de nubes: 1%.
- Acimut del Sol para el instante de registro: 141.749635°.
- Elevación del Sol para el instante de registro: 57.811798°.
- Fecha y hora de registro: 2013-08-09; 11:02:38.

Sensor ASTER a bordo del satélite Terra: el satélite Terra forma parte de la misión *Earth Observing Systems (EOS)*, denominado cómo: AM-1. Se lanzó por la NASA, con la colaboración de las siguientes entidades japonesas: Ministro de Economía, Industria y Comercio y Sistemas Espaciales. El satélite se lanzó por la NASA, y colaboradores, el día 18 de diciembre de 1999 en la base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California. Sensores: registro en la región del espectro EM del visible e infrarrojo próximo (VNIR), registro en infrarrojo medio (SWIR) y registro en la región térmica (TIR). Tipo de sensores: para el registro del infrarrojo próximo y medio, los sensores son tipo *pushbroom*. El sensor en el infrarrojo térmico es de tipo *whiskbroom*. Resolución radiométrica: 8 bit (256 niveles de intensidad) para las bandas pertenecientes al visible, infrarrojo próximo y medio. Para el infrarrojo térmico la resolución radiométrica es de 12 bit (4096 niveles de intensidad). Sistema de Referencia: *Navigation Base Reference (NBR)*. Tipo de órbita y frecuencia: circular sincronizada con el Sol, próxima a la órbita polar a una altitud de

705 km, inclinación de 98.3°, circunda a la Tierra cada 98.99 minutos y completa un ciclo a los 16 días; pasa por el Ecuador a las 10:30 a.m. La resolución espacial es de 15 m en la región visible e infrarrojo próximo, 30 m en infrarrojo medio y 90 m en infrarrojo térmico. En la siguiente tabla se adjuntan los dominios espectrales asociados a cada banda.

Tabla 8: características espectrales sensor ASTER.

Banda sensor ASTER	Dominio espectral	Región espectro EM
1	0.52-0.60 $\mu\text{m}$	Visible
2	0.63-0.69 $\mu\text{m}$	Visible
3N	0.78-0.86 $\mu\text{m}$	Visible
3B	0.78-0.86 $\mu\text{m}$	Visible
4	1.60-1.70 $\mu\text{m}$	Infrarrojo medio
5	2.145-2.185 $\mu\text{m}$	Infrarrojo medio
6	2.185-2.225 $\mu\text{m}$	Infrarrojo medio
7	2.235-2.285 $\mu\text{m}$	Infrarrojo medio
8	2.295-2.365 $\mu\text{m}$	Infrarrojo medio
9	2.360-2.430 $\mu\text{m}$	Infrarrojo medio
10	8.125-8.475 $\mu\text{m}$	Infrarrojo térmico
11	8.475-8.825 $\mu\text{m}$	Infrarrojo térmico
12	8.925-9.275 $\mu\text{m}$	Infrarrojo térmico
13	10.25-10.95 $\mu\text{m}$	Infrarrojo térmico
14	10.95-11.65 $\mu\text{m}$	Infrarrojo térmico

Características específicas de la escena (utilizada en el presente Trabajo Fin de Grado) capturada por el sensor ASTER a bordo del satélite Terra:

- Sistema de referencia y proyección asociada: WGS-84, UTM 30 N.
- Densidad de nubes: 1%.
- Acimut del Sol para el instante de registro: 139.337947°.
- Elevación del Sol para el instante de registro: 65.4998970°.
- Fecha y hora de registro: 2005-07-03; 11:11:44.

### 2.1.1 Nivel de procesamiento

Las imágenes capturadas por los sensores TM, ETM+ y OLI, fueron descargadas en el mismo nivel de procesamiento: *Level 1 Product Generation System*. A continuación se comentan las características de dicho nivel.

- Nivel 1T: datos corregidos por efectos del relieve. Implementa una corrección radiométrica (radiancia espectral en el sensor en formato de ND de 8-bit). Incluye una

corrección geométrica de precisión en la que se utiliza un modelo digital de elevaciones (MDE). La precisión es función de la distribución de puntos de control a lo largo de la escena así como de la calidad del MDE.

- Parámetros de procesado:

*Tabla 9: parámetros de procesado para datos descargados en el nivel 1T.*

<b>Tamaño píxel</b>	<b>30 m</b>
<b>Formato de salida</b>	GeoTIFF
<b>Método de remuestreo</b>	Convolución cúbica
<b>Proyección cartográfica</b>	Universal Transversa de Mercator (UTM)
<b>Datum elipsoidal</b>	WGS84
<b>Orientación imagen</b>	Norte hacia arriba
<b>Distribución</b>	FTP y HTTP

- Archivos que acompañan a las imágenes (USGS, 2013):

*Tabla 10: archivos que vienen con las imágenes. En rojo el nivel descargado para los datos del presente proyecto. Fuente: USGS.*

<b>Tipo de archivo</b>	<b>L1G</b>	<b>L1Gt</b>	<b>L1T</b>
<i>L1 image file (for each requested band)</i>	X	X	X
<i>L1 Metadata file (text [.txt] file)</i>	X	X	X
<i>GCP file (text [.txt] file)</i>		X	
<i>Three Band Verification Browse Image (JPEG [.JPG] file)</i>		X	
<i>Geometric Verification Statistics file (text [.txt] file)</i>		X	

- Puntos de control: Se incluye una imagen (figura 25) de distribución de los puntos de control mayor (PCM).
- Metadatos: Se incluye una descripción del sensor, parámetros de proyección, datos de calibración, situación del sol para el instante de captura; conjuntamente con otros datos que se pueden necesitar para los demás procesos.

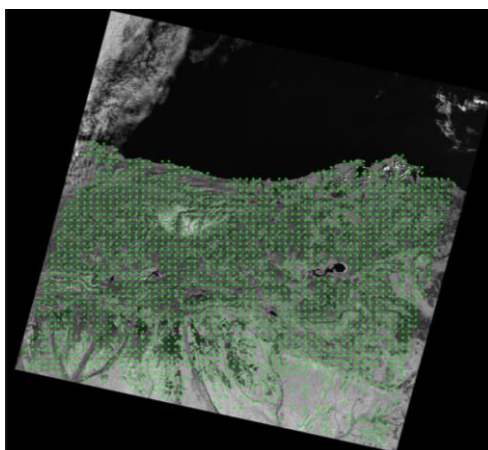


Figura 25: distribución de PCM en la escena de interés. Fuente: USGS.

Nivel de procesamiento de imágenes capturadas por el sensor ASTER: L1A y L1B. Los datos del nivel L1A incluyen una serie de metadatos, por cada banda, en el que se encuentran los parámetros de corrección geométrica así como los parámetros de corrección radiométrica. Los datos correspondientes al nivel L1B son datos a los que se les han aplicado los coeficientes antes mencionados. Para el presente Trabajo Fin de Grado se descargaron ambos niveles de procesamiento; el nivel L1A se utilizará para la elaboración de un MDT; mientras que el L1B se utiliza para los otros procedimientos. Se incluye un diagrama que muestra los distintos archivos que contiene una imagen descargada en el nivel L1B.

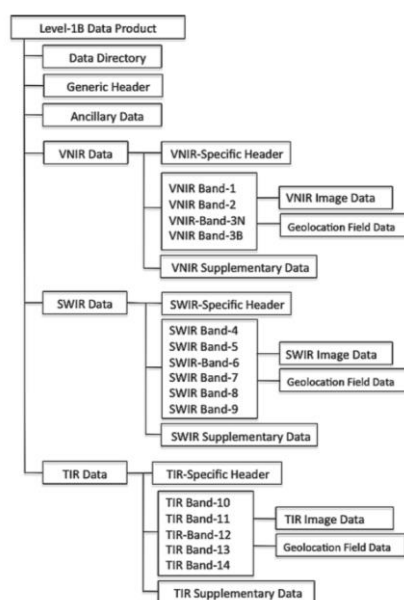


Figura 26: estructura nivel de datos L1B. Fuente: ASTER handbook.

Los archivos se pueden descargar en formato Geotiff o en formato HDF (*Hierarchical Data Format*). Dado que el software soporta el formato HDF se descargaron en dicho formato.



## 2.2 Características sensor e imagen hiperespectral

Hyperion es uno de los sensores incluidos dentro del satélite Earth Observing (EO-1). Dicho satélite fue lanzado el día 21 de noviembre del 2000 desde la base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California. El satélite EO-1 incluye otro sensor hiperespectral *Advanced Land Imager* (ALI) así como un corrector atmosférico. Los parámetros geométricos del satélite coinciden sensiblemente con los del satélite Landsat-7; la única diferencia es el que el satélite EO-1 se encuentra retrasado un minuto respecto del satélite Landsat-7. En la siguiente imagen se puede ver una de las múltiples situaciones espaciales que se dan entre los satélites antes comparados.

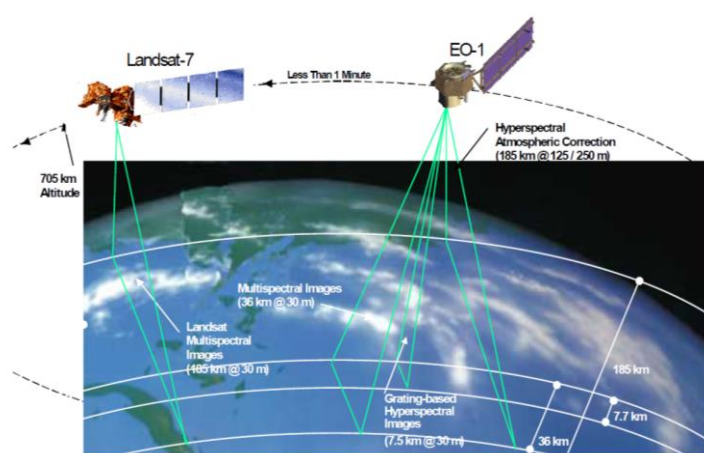


Figura 27: situación espacio-temporal para los satélites Landsat-7 EO-1. Fuente: EO1 data user guide.

El sensor Hyperion es de tipo *pushbroom*. Las dimensiones de la escena registrada por este sensor son: 7.65 km x 185 km. La resolución espacial es de 30 m. La resolución radiométrica es de 12 bit para todas las bandas de registro. Los dominios espectrales de cada banda de registro se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11: características espectrales sensor Hyperion.

Configuración espectral sensor Hyperion		
	Rango espectral calibrado: 196 bandas.	Ancho de banda.
Visible	0.40 - 1.00 $\mu\text{m}$	10 nm
Infrarrojo próximo y medio	0.90 – 2.50 $\mu\text{m}$	10 nm

Características específicas de la escena 1 (utilizada en el presente Trabajo Fin de Grado) capturada por el sensor Hyperion a bordo del satélite EO-1:

- Sistema de referencia: WGS-84.
- Fecha y hora de registro: 2003-01-19; 10:43:39.

Características específicas de la escena 2 (utilizada en el presente Trabajo Fin de Grado) capturada por el sensor Hyperion a bordo del satélite EO-1:

- Sistema de referencia: WGS-84.
- Fecha y hora de registro: 2003-11-03; 10:43:33.

Características específicas de la escena 3 (utilizada en el presente Trabajo Fin de Grado) capturada por el sensor Hyperion a bordo del satélite EO-1:

- Sistema de referencia: WGS-84.
- Fecha y hora de registro: 2002-10-06; 10:49:07.

### **2.2.1 Nivel de procesado**

Se descargaron los niveles L1T y L1R. El nivel L1T coincide con lo explicado en el apartado 2.1.1. El nivel L1R contiene la calibración radiométrica necesaria para la obtención de magnitudes físicas.

## **2.2 Sistemas de observación espaciales (captura de datos).**

Los sistemas de observación espaciales se pueden clasificar atendiendo a varias características. Algunas de ellas pueden ser: tipo de órbita, misión, tipo de registro, etc. En este apartado se analizarán las características fundamentales de los programas de interés. La primera clasificación se realiza atendiendo al tipo de recepción que se tiene de la señal procedente del cuerpo de interés- en este caso es la Tierra-. Se distinguen dos tipos de sensores, pasivos y activos. Los sensores pasivos, y de interés para el objetivo de la presente, son aquellos que registran energía electromagnética procedente de la Tierra (reflejada por la Tierra al ser radiada por el Sol). Es decir, no emiten ningún tipo de pulso que interactúe con el cuerpo en cuestión y devuelva una señal, como sucede con los sensores activos (tipo RADAR, SONAR, etc.). Esta clasificación lleva implícito un dominio de registro de datos en el espectro electromagnético. En la siguiente figura se puede ver los principales dominios de registro atendiendo a los sensores pasivos y activos.

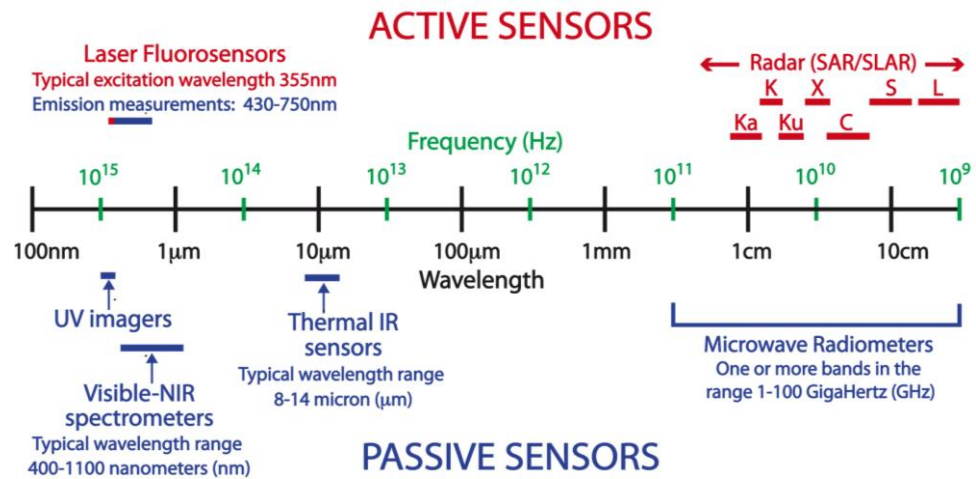


Figura 28: dominios de captura de datos para sensores activos y pasivos. Fuente: Science Education through Earth Observation for High Schools. Programme of the European Commission.

Dentro de los sensores pasivos se puede establecer una clasificación atendiendo a la mecánica del sensor. Se distinguen fundamentalmente sistemas de barrido transversal, o sistemas tipo *whiskbroom*, además de sistemas de barrido longitudinal, o sistemas tipo *pushbroom*. Existen subclasificaciones dentro de estos sistemas con barrido circular o lateral. En las siguientes imágenes se puede ver el *modus operandi* de los sistemas descritos anteriormente.

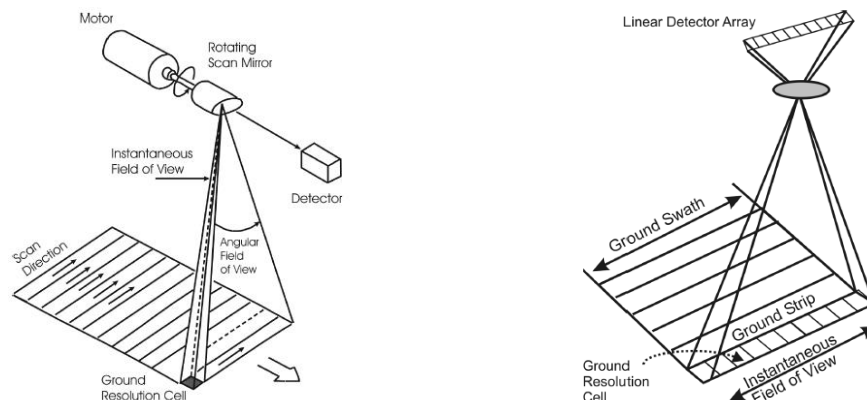


Figura 29: tipos de escáner de registro de datos. Clasificación atendiendo a la mecánica del sensor. Fuente: Remote Sensing from air and space, Olsen (2007).

Sensores de barrido transversal (*whiskbroom*). Gracias al espejo rotatorio, que incluye la mecánica del sensor, el escáner ejecuta sendos barridos en disposición ortogonal a la dirección de la línea de vuelo. El rango de barrido se encuentra acotado en un rango espacial que puede ir desde 90° a 120°. Dicho rango es lo que se muestra en la figura 29 izquierda como *angular field of view*. Para cualquier instante de tiempo de registro el escáner detecta la energía que se encuentra dentro del campo de visión instantáneo (IFOV). El IFOV, *instantaneous field of view*, se puede definir como el ángulo sólido por medio del cual el sensor detecta la energía proveniente del

terreno (reflejada o emitida). Toda la energía que se propaga hacia el instrumento dentro del IFOV contribuye al nivel de respuesta por parte del detector para cualquier instante.

Sensores de barrido longitudinal (*pushbroom*). Utiliza el movimiento del avión para construir una imagen bidimensional por medio de almacenar sucesivas líneas de escaneado que se encuentran perpendicular a la línea de vuelo. En este tipo de mecánica se sustituye el espejo rotatorio por un sistema vector. Se puede plantear la analogía con la fotogrametría tradicional si se considera la proyección del sistema lineal, o vector, sobre el terreno con una fotografía aérea para un determinado instante. Los vectores están formados por dispositivos de carga acoplada (CCD) que se posicionan de inicio a fin del vector. Cada vector registra la energía reflejada por el terreno en una única columna de datos. Si se trata de un sistema multibanda, existirán tantas columnas como bandas tenga el sensor para una misma proyección del vector sobre el terreno.

*Pushbroom VS whiskbroom*. A continuación se exponen algunas ventajas de una mecánica respecto de la otra; no obstante, el tipo de proyecto a realizar es el que define el sensor más apropiado. Los sensores de empuje ofrecen la oportunidad a cada vector de aumentar el tiempo de exposición sobre el cual se va a registrar la energía en la proyección del mismo sobre el terreno. Esto se traduce en una señal más fuerte que permite obtener una mejor discriminación radiométrica de la escena. En cuanto a geometría los sensores de empuje tienen una relación de semejanza que se puede asumir como constante. Por otra parte los sensores de barrido transversal introducen un error debido a que la unidad de resolución en el terreno varía su ancho a medida que el barrido se aleja del nadir. Otra ventaja de los sensores de empuje se encuentra en la relación tamaño/peso frente a los sensores de barrido transversal, además de la durabilidad que ha resultado mayor para los escáneres tipo *pushbroom*. Como desventaja de estos últimos se puede citar la necesidad de calibración de varios detectores, lo que puede suponer una limitación relativa en la medida de la sensibilidad espectral.

### **2.2.1 Fuentes de error en la geometría.**

En este apartado se describen las fuentes de errores geométricos más relevantes en los procesos de Teledetección.

1. Perturbaciones orbitales. La órbita de un satélite alrededor de la Tierra se puede ver afectada por diversos factores:
  - Fuerzas gravitatorias (fundamentalmente la atracción por el Sol y la Luna), fuerzas de la presión ejercida por la radiación solar (viento solar), fricción con la atmósfera en órbitas bajas (LEO), irregularidad del campo gravitatorio de la Tierra (principalmente se debe a que la tierra no es una esfera ni un elipsoide y a que la distribución de masas no es homogénea).

- Perturbaciones de las órbitas producidas por la Luna y el Sol (figura 30). La eclíptica (plano en el que el Sol realiza su movimiento aparente en la Tierra) está inclinada  $7.3^\circ$  respecto al Ecuador del Sol, el eje de rotación de la tierra está inclinado  $23^\circ$  sobre el plano de la eclíptica y la Luna gira en un plano inclinado  $5^\circ$  sobre el plano ecuatorial de la Tierra.

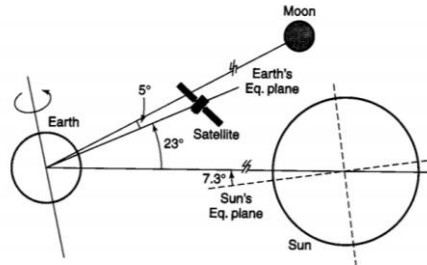


Figura 30: perturbaciones de las órbitas producidas por la Luna y el Sol. Fuente: Pratt, 2003.

- Efectos de las irregularidades del campo gravitatorio terrestre: regresión nodal (cambio de plano orbital), rotación apsidal (rotación del apogeo en el mismo plano).
- Perturbaciones a causa de la presión solar. Modificación de la excentricidad de la órbita en periodos anuales. Se debe considerar en satélites de órbita baja (LEO) el flujo solar irradiado por la Tierra.
- Rozamiento aerodinámico. Se debe considerar para satélites que sigan órbitas tipo LEO. Hasta más de 3000 km de altura no se puede despreciar el rozamiento de las capas altas de la atmósfera. La consecuencia principal es la reducción del semieje mayor de la órbita. Las estaciones de control modifican los parámetros geométricos del satélite para no caiga a la superficie terrestre.

Los efectos descritos anteriormente se transforman en irregularidades geométricas de la escena registrada. A día de hoy es bastante difícil modelar la influencia de cada uno de los factores citados; no obstante, algunas de dichas irregularidades geométricas o malformaciones se pueden ver en la figura 31.

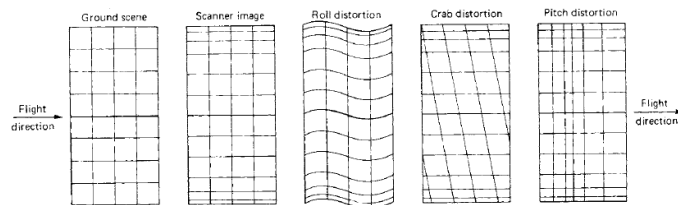


Figura 31: distorsiones por perturbación orbital. Fuente: Remote Sensing and Image Interpretation, Kiefer and Lillesand (2004).

2. Errores inherentes al tipo de sensor. En función del tipo de sensor a utilizar se pueden dar los siguientes errores:

- Distorsión tangencial (figura 32). Este problema se da en sensores de barrido transversal y surge debido a que el espejo giratorio del escáner rota a una velocidad angular constante, mientras que la unidad de resolución del terreno para cada instante de captura es diferente (más a medida que incrementa la distancia desde el nadir).

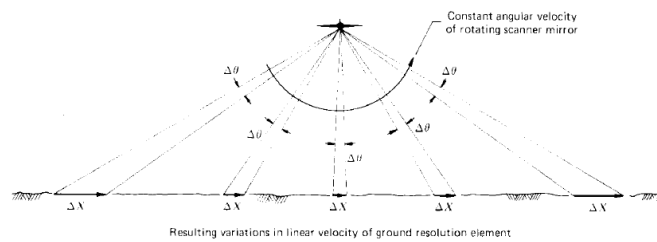


Figura 32: distorsión tangencial. Fuente: *Remote Sensing and Image Interpretation*, Kiefer and Lillesand (2004).

- Variación en el tamaño de la unidad de resolución en el terreno (figura 33). El tamaño de la unidad de resolución en terreno varía a medida que el barrido se aleja del nadir. El verdadero tamaño y forma de la unidad de resolución en el terreno no es sólo función de la altura de la plataforma y del IFOV; también influye el tiempo de respuesta de la electrónica del escáner.

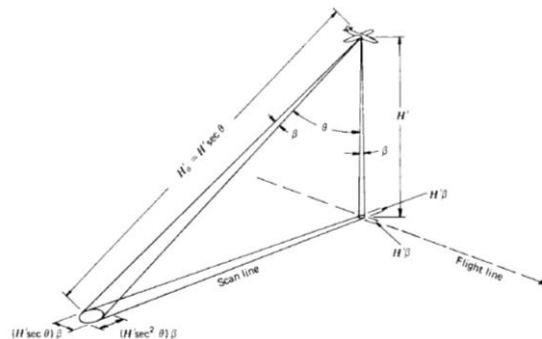


Figura 33: cambio en la unidad de resolución en el terreno. Fuente: *Remote Sensing and Image Interpretation*, Kiefer and Lillesand (2004).

3. Errores debido a la topografía. Mayor en la medida en la que más altura tenga un cuerpo a representar y más alejado esté del nadir. El objeto va a aparecer en perspectiva (figura 34).

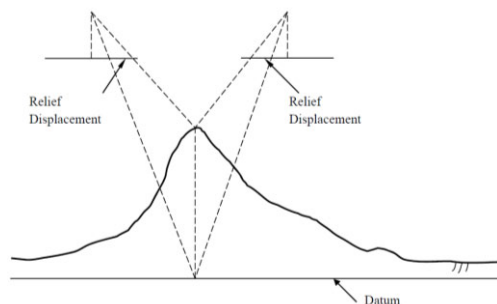


Figura 34: error debido a la topografía. Fuente: Liang-Chien Chen, 2011.

### 2.2.2 Fuentes de error en la radiometría.

1. Variaciones en la intensidad de radiación registrada. Esta fuente de error se da sobre todo en sensores tipo *whiskbroom*. Al variar el tamaño de la celda a medida que el barrido se aleja del nadir, se registra mayor intensidad porque la unidad de resolución en el terreno es mayor. Aunque radiométricamente se registra una intensidad más alta, si se pretende discriminar un objeto de menor tamaño que la unidad de resolución en terreno, para un determinado ángulo, el material de fondo contamina su reflectividad aportando la suya propia.
2. Tipo de superficie (figura 35). La forma geométrica en la que un cuerpo refleja energía es de vital importancia. El factor fundamental es la rugosidad de la superficie del objeto de interés. Atendiendo a este criterio se pueden considerar:
  - Reflectores especulares. Trabajan bajo el principio clásico de óptica. El ángulo en el que incide la energía es igual al ángulo de energía reflejada.
  - Reflectores difusos (o lambertianos). La reflexión de la energía se produce uniformemente en todas las direcciones.

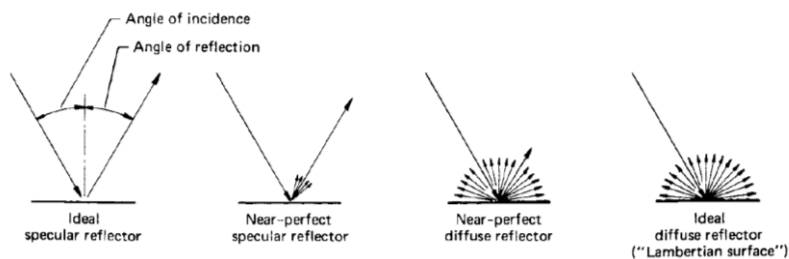


Figura 35: tipos de reflectividad atendiendo a la rugosidad de la superficie del objeto. Fuente: Remote Sensing and Image Interpretation, Kieffer and Lillesand (2004).

3. Calibración interna de la parte térmica del escáner. En función de la precisión de la calibración se obtendrán datos de mejor o peor calidad. Se distinguen fundamentalmente dos tipos de calibración: una a bordo del satélite y otra realizando medidas sobre el

terreno. La primera consiste en ubicar dos referencias térmicas, que funcionen como dos cuerpos negros, en los dos extremos del barrido. Cuando se produce el barrido, el escáner detecta el elemento de referencia, barre el área de interés y compara con la otra referencia que se encuentra en el otro extremo. Las temperaturas se pueden controlar desde las estaciones de control. Por otro lado, si se mide la excitancia radiante en determinados puntos del terreno, que no presenten variaciones significativas en temperatura a lo largo del tiempo, y luego se identifica la excitancia radiante de dichos puntos tomada por el sensor, ajustando una curva por mínimos cuadrados, normalmente regresión lineal o logarítmica, se pueden calibrar los datos del sensor. Este último modelo se usa también para modelizar la influencia atmosférica, uno de tantos modelos, sobre los datos registrados.

4. La atmósfera. Dada la complejidad de esta fuente de error, se desarrolla un estudio más profundo sobre la misma. Se remite al lector al apartado 2.3.

### **2.2.3 Correcciones geométricas.**

En ese apartado se pretende exponer brevemente las correcciones geométricas. Las correcciones geométricas modelan la deformación que sufre la imagen en el instante de registro. Existe una gran variedad de modelos matemáticos, pero dado el alcance del presente proyecto, sólo se comentan algunos de ellos.

En las correcciones geométricas se distinguen las siguientes fases:

- Registro: se pretende que una misma área quede cubierta para dos imágenes distintas, es decir, tomando un píxel de ambas imágenes se tienen que obtener dos muestras de un mismo objeto.
- Rectificación: transformación de una imagen en mapa. Si la transformación lleva asociado un Sistema de Referencia oficial, el proceso incluiría georreferenciación.
- Geocodificación: casuística del proceso de rectificación en el que se establece un tamaño de píxel estándar, normalmente para la superposición de distintas capas en un Sistema de Información Geográfica (SIG).
- Ortorrectificación: corrección de la imagen, píxel por píxel, del desplazamiento debido al relieve. El producto resultante será la imagen en una rigurosa proyección ortogonal.

Existen dos modelos para efectuar una rectificación (Schowengerdt, 2006): el primero de ellos es un modelo en dos pasos: en el primer paso conociendo los parámetros del satélite (posición, altitud, tipo de órbita y geometría de escaneado) y con un modelo de Tierra específico se realiza una primera rectificación. Posteriormente se efectúa un remuestreo y se realiza una transformación (dependiendo del tipo de imagen y del propósito, se utilizarán polinomios de



grado variable o funciones más complejas) con Puntos de Control Mayor (PCM). Como esto genera desplazamiento de los píxeles se vuelve a realizar un remuestreo. Segundo modelo: cálculo de la rectificación incluyendo parámetros del satélite, modelo de tierra y PCM en un solo paso. La obtención de la escena rectificada terminaría con un remuestreo.

A continuación se va a desarrollar en más profundidad el segundo modelo (un paso): el objetivo es ajustar los coeficientes de un polinomio cuadrático por mínimos cuadrados. Para el ajuste hace falta que se disponga de coordenadas en el sistema de referencia terreno y coordenadas en el sistema de referencia imagen para un mismo punto. Teniendo los puntos identificados se puede establecer:

$$x = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} a_{ij} X_{ref}^i Y_{ref}^j ;$$

$$y = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} b_{ij} X_{ref}^i Y_{ref}^j ;$$

Para el caso de un polinomio cuadrático se tiene:

$$x = a_{00} + a_{10}X_{ref} + a_{01}Y_{ref} + a_{11}X_{ref}Y_{ref} + a_{20}X_{ref}^2 + a_{02}Y_{ref}^2 ;$$

$$y = b_{00} + b_{10}X_{ref} + b_{01}Y_{ref} + b_{11}X_{ref}Y_{ref} + b_{20}X_{ref}^2 + b_{02}Y_{ref}^2 ;$$

Donde:

$a_{00}$  y  $b_{00}$  : Cambio en  $x$  e  $y$ ;

$a_{10}$  y  $b_{10}$  : Escala en  $x$  e  $y$ ;

$a_{01}$  y  $b_{01}$  : Deformación tangencial  $x$  e  $y$ ;

$a_{11}$  y  $b_{11}$  : Escala en  $x$  dependiente de  $y$  y en  $y$  dependiente de  $x$ ;

$a_{20}$  y  $b_{20}$  : Escala en  $x$  e  $y$  no lineal;

$a_{02}$  y  $b_{02}$  : Cambio en  $x$  dependiendo de  $y$  y de  $y$  dependiendo de  $x$ ;

En la siguiente figura se modeliza el efecto de cada uno de los coeficientes del polinomio cuadrático. Para aquellos casos en los que los el registro de la imagen lleve incorporado una corrección de errores sistemáticos, los polinomios anteriores son válidos hasta la parte lineal. Este caso particular se denomina transformación bidimensional afín. La reducción de incógnitas es de la mitad.

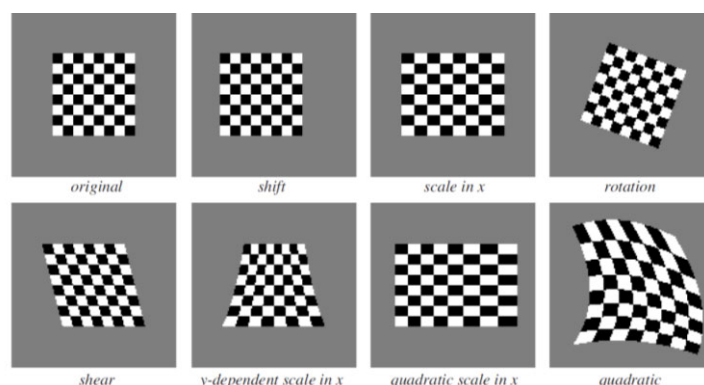


Figura 36: efectos de los coeficientes de los polinomios. Modelización de distorsión. Fuente: Schowengerdt, 2006.

Una metodología empleada para rectificar imágenes tomadas con el sensor MSS consistía en utilizar una transformación bidimensional en la que la matriz de diseño (aquella compuesta por los coeficientes cuyos subíndices son distintos de 00) era producto de otras tres matrices. Las tres matrices consistían en los efectos de distorsión debidos a: relación en la escala x e y, rotación de la tierra y giro de la imagen para que quede orientada hacia el norte.

Una vez corregida la geometría el píxel se desplaza de su situación de registro; por esta razón se efectúa un remuestreo. El remuestreo se puede hacer por el método del vecino más próximo, por interpolación bilineal o por convolución cúbica. La elección del tipo de remuestreo, depende siempre de la finalidad del proyecto.

La mejora en resolución espacial ha demandado una mejora en la modelización de distorsiones. Para imágenes tomadas por sensores de muy alta resolución (IKONOS, QuickBird, etc.) se emplean funciones racionales en dos y tres dimensiones (conocidas como funciones *RCP-rational coefficients models*-) o funciones expresadas mediante las ecuaciones de colinealidad (método conocido como *RM-rigorous model*-), donde las últimas han dado mejores resultados. El tema es muy interesante pero escapa del alcance del presente proyecto.

#### **2.2.4 Correcciones radiométricas aplicadas a imágenes capturadas por sensores multiespectrales.**

La primera clasificación que se puede realizar a las correcciones radiométricas puede ser atendiendo a la calibración de los sensores (se consideran las calibraciones para los sensores TM). Se distinguen: calibración radiométrica absoluta y calibración radiométrica relativa (Thome, Markham y otros, 1997).

- Calibración relativa: también conocidas como especificaciones de histogramas. Esta corrección consiste en modificar el nivel de intensidad, de un píxel

perteneciente a la imagen a corregir, mediante una transformación que ajuste el histograma de la imagen a transformar a un histograma procedente de la imagen de referencia.

- Calibración absoluta: las calibraciones absolutas son métodos que permiten convertir niveles digitales en magnitudes físicas, como por ejemplo radiancia. Admiten sub-clasificación en:

Calibración absoluta pre-lanzamiento: se trata de una calibración llevada a cabo en laboratorio previo al lanzamiento del satélite. En esta fase se fijarán las referencias internas que llevará el satélite a bordo para realizar la calibración en vuelo. La metodología consiste en la utilización de una esfera en la que se distribuyen diferentes entradas de fuentes de iluminación. Se tiene además un dispositivo, que funciona como la pupila del ojo humano, a través del cual pasa la energía emanada por las fuentes de iluminación. Dicha señal es conducida y registrada por el sensor. La respuesta del sensor es comparada con una respuesta espectral conocida, o tipificada, obtenida por metodología e instrumental más sofisticado. Se realiza el cómputo de la regresión que se considere y se obtienen coeficientes (o ganancias) y off-sets que permiten pasar de la curva registrada a la curva teórica. Normalmente los valores teóricos son los establecidos por organismos como *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Para calibrar la banda 6 se utilizan objetos que simulen el comportamiento de un cuerpo negro y las situaciones de observación y registro se realizan en una cámara con condiciones controladas. Por el método descrito anteriormente se obtiene la ganancia para un cuerpo negro que se encuentre a una temperatura de 308° K (es la temperatura a la que se encuentra la referencia térmica que va a bordo del sensor).

Calibración en vuelo: la calibración en vuelo es diferente para la banda 6 que para las demás. Para la calibración de dicha banda el sensor cuenta con dos referencias externas con temperaturas diferentes, una caliente y una fría. Por cada barrido el sensor registra una referencia, la escena y finalmente la otra referencia; A continuación ajusta los valores observados a la referencia obtenida en la calibración pre-lanzamiento. Para las demás bandas el sensor cuenta con fuentes de iluminación abordo (conocido como *Internal Calibration*), un obturador, así como fuentes de iluminación redundantes (de filamentos de tungsteno). Junto al obturador se encuentra acoplado un espejo rotatorio además de un filtro de densidad neutra. El espejo refleja la luz incidente radiada por las fuentes de iluminación a través del filtro de densidad neutra y lo dirige hacia el primer plano

focal. El filtro tiene una forma geométrica curva, de forma que, la atenuación varía a medida que el mismo rota junto a los mecanismos con los que va acoplado. El obturador tiene las dimensiones y funcionalidad que permite prevenir la entrada directa de la energía radiada sobre el primer plano focal. El registro del sistema de calibración aumenta hasta llegar a un punto en el que se satura (máximo absoluto), luego disminuye progresivamente a medida que el mecanismo obturador-espejo-filtro va rotando. La calibración abordo se repite al finalizar cada línea de barrido y depende fundamentalmente de lo bien que esté la calibración pre-vuelo. En la figura 37 se pueden apreciar los componentes que lleva a bordo el sistema de calibración interna del satélite Landsat-4.

Calibración post-lanzamiento (estaciones de control): estas calibraciones se realizan una vez se ha efectuado el registro de datos y se dispone del mismo en las estaciones de control que correspondan. Se basan fundamentalmente en la obtención de modelos analíticos y empíricos. Dichos modelos se suelen parametrizar en función de datos obtenidos por vuelos radiométricos y campañas de campo (en las que se utilizan espectralradiómetros) sobre zonas estudiadas (las zonas desérticas suelen dar buenos resultados).

Además de las correcciones que realizan los organismos con competencias en adquisición y tratamiento de los datos, existen otras que dependen exclusivamente del propósito y uso de la imagen. A continuación se estudiarán las más habituales:

- Corrección por pérdida de información debido a la falta de funcionalidad de uno o más detectores. Este fenómeno se muestra en la figura 38. Como se puede ver en la imagen existen determinados píxeles en los que no se registraron datos. Dicho fenómeno supone un hándicap importante dado que visualmente se puede solucionar, pero la firma espectral (del objeto que se trate) no es nada rigurosa. Su valor se obtiene mediante una interpolación de la caracterización radiométrica de los píxeles vecinos.

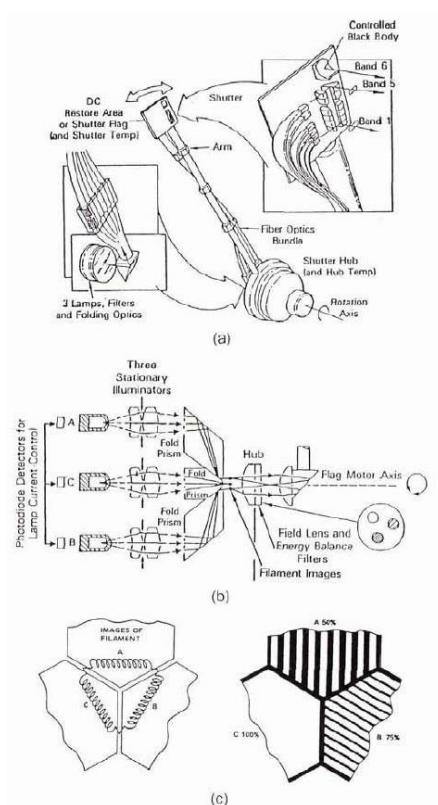


Figura 37: (a) Conjunto de fibras unidas a un brazo oscilante conectadas a seis registros de luz. (b) Fuentes de iluminación y trayectoria seguida por la energía radiada. (c) Muestra del filtro correspondiente a cada fuente de iluminación. Fuente: Radiometric Calibration of Landsat, ASPRS, 1997.

Algunos autores sugieren estimar la información perdida mediante el cómputo promediado de los valores de los píxeles vecinos (Chuvieco, 2000).

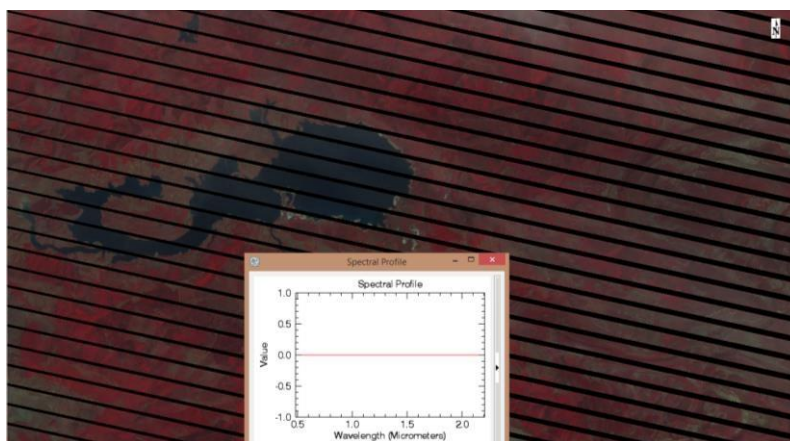


Figura 38: zona de estudio en combinación falso color con pérdida de información en algunos píxeles. Fuente: USGS, imagen Landsat-7 (ETM+), 9 de septiembre 2014, Embalse del Ebro, España.

En la siguiente imagen se presenta a modo de ejemplo la imagen corregida de este efecto.

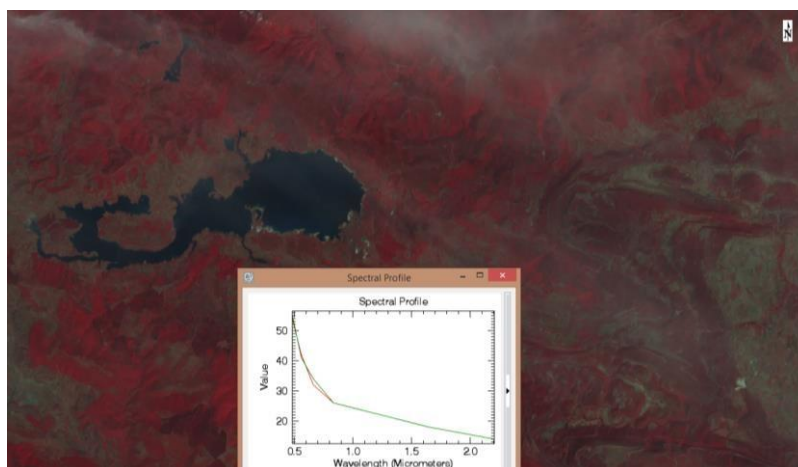


Figura 39: zona de estudio en combinación falso color con interpolación en píxeles perdidos. Fuente: USGS, imagen Landsat-7 (ETM+), 9 de septiembre 2014, Embalse del Ebro, España.

- Corrección por bandeo de imagen. El error se basa en que algunos de los detectores que conforman el sensor codifiquen la irradiancia que reciben en niveles digitales superiores o inferiores al resto. Dicho fenómeno se manifiesta en líneas significativamente más claras y más oscuras para zonas que deberían tener una respuesta espectral más homogénea. La forma más habitual de corregir este error es mediante la aplicación de unos coeficientes lineales (sesgo y ganancia) a los histogramas de cada detector, con objeto de igualar sus medias y desviaciones típicas con las que ofrece el histograma de referencia (proveniente de una sub-imagen de la misma escena).
- Corrección atmosférica. La corrección atmosférica se estudiará en el apartado 2.3 de la presente sección.
- Conversión de ND a parámetros físicos. Los datos registrados por el sensor corresponden a la relación que se establece entre luz incidente y la capacidad generadora de electrones del fotodiodo (Ormeño, 2006). Aunque los valores obtenidos directamente por el sensor tienen competencias a la hora de la clasificación de suelos de un territorio, al ser estos mutuamente excluyentes en el espacio, no deja de ser una medida relativa. Si se pretende caracterizar cuantitativamente la escena en cuestión, la obtención de parámetros rigurosos para un determinado instante y para un determinado material es totalmente indispensable. Para expresar los niveles digitales registrados en magnitudes físicas se realizan las siguientes transformaciones:

1. Estandarización ND: los ND de los píxeles registrados se transforman en unidades absolutas de radiancia, utilizando en los cálculos variables tipo float de 32-bit. Posteriormente dichos valores son re-escalados (para TM y ETM+) en valores de radiancia de 8-bit (Chander y otros 2009). En los datos nivel 1 de los diferentes programas de Landsat los ND de las imágenes vienen estandarizados.
2. Conversión de ND estándar a radiancia espectral en el sensor (TM y ETM+): para pasar a valores de radiancia en el sensor se utilizan los parámetros que se indican en los metadatos de las imágenes. Si no se dispone de dichos parámetros la NASA ofrece actualizaciones de dichos parámetros las cuales pueden ser descargadas desde su página web. La siguiente ecuación realiza la transformación de ND a radiancia espectral en el sensor:

$$L_{\lambda} = \left( \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \right) \cdot (Q - Q_{\min}) + L_{\min \lambda};$$

Donde:

$L_{\lambda}$ : Radiancia espectral en el sensor. Unidades:  $\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}$ .

$Q$ : Valor del píxel previamente estandarizado. Unidades: ND.

$Q_{\min}$ : Valor mínimo del píxel calibrado correspondiente a  $L_{\min \lambda}$ . Unidades: ND.

$Q_{\max}$ : Valor máximo del píxel calibrado correspondiente a  $L_{\max \lambda}$ . Unidades: ND.

$L_{\min \lambda}$ : Radiancia espectral en sensor escalada para  $Q_{\min}$ . Unidades:  $\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}$ .

$L_{\max \lambda}$ : Radiancia espectral en sensor escalada para  $Q_{\max}$ . Unidades:  $\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}$ .

La misma ecuación se puede escribir en la forma:

$$L_{\lambda} = G \cdot Q + B;$$

Donde:

$G$ : Factor de ganancia para cada banda. Unidades:  $\frac{\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}}{ND}$ .

$B$ : Sesgo u *off-set* de cada banda. Unidades:  $\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}$ .

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo los factores mencionados antes que llevan los metadatos asociados a una imagen registrada por el sensor TM del programa Landsat-4 para el día 9 de septiembre de 2014.

Tabla 12: factores de ganancia y sesgo para una imagen tomada por el sensor TM del programa Landsat-4.

	$\lambda$ Units = $\mu\text{m}$	FWHM <sup>4</sup> Units $\mu\text{m}$	Rad G Units $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m})$	Rad O Units $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ sr } \mu\text{m})$	Irrad Units $\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$
Band 1	0.4830	0.070	11.810	-738.070	1997.0
Band 2	0.560	0.080	1.210	-760.980	1812.0
Band 3	0.6620	0.060	0.9430	-594.250	1533.0
Band 4	0.8350	0.120	0.9690	-606.930	1039.0
Band 5	16.480	0.20	0.1910	-119.120	230.80
Band 7	22.060	0.260	0.0660	-0.41650	84.90

3. Estimación de radiancia en suelo: La radiancia detectada por el sensor depende de varios factores: radiación solar incidente sobre el cuerpo, respuesta de la cubierta terrestre y contribución de la atmósfera. Algebráicamente se establece la siguiente relación para cada banda (Chuvieco, 2000):

$$L_{\text{sensor}} = L_{\text{suelo}} \cdot \rho \cdot \tau + L_{\text{dispersión}};$$

Donde:

$L_{\text{sensor}}$ : reflectancia medida en el sensor. Unidades:  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}}$ .

$L_{\text{suelo}}$ : reflectancia obtenida en superficie. Unidades:  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}}$ .

$\rho$ : reflectividad espectral de la cubierta. Unidades: adimensional.

$\tau$ : transmisividad de la atmósfera. Unidades: adimensional.

$L_{\text{dispersión}}$ : radiancia aportada por la dispersión atmosférica.

Si se dispone de la orientación y altura del sol sobre la escena la reflectividad obtenida en superficie se puede expresar de la forma:

$$L_{\text{suelo}} = \frac{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta}{d \cdot \pi};$$

Donde:

$ESUN_{\lambda}$ : Irradiancia solar exoatmosférica media. Unidades:  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}}$ .

$\theta$ : Ángulo Cenital. Unidades: grados sexagesimales.

$d$ : distancia Tierra – Sol. Unidades: u. astronómicas.

Sustituyendo la segunda fórmula en la primera y despreciando los efectos atmosféricos se obtiene una reflectividad en superficie que responde a la fórmula:

$$\rho = \frac{\pi \cdot L_{\text{sensor}} \cdot d}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s};$$

<sup>4</sup> FWHM: Full Width Half Maximum. Anchura a media altura que presenta un pico de emisión.



4. Conversión de valores de radiancia espectral en el sensor a valores de temperatura: los valores registrados por la banda 6 para los sensores TM y ETM+ pueden transformarse en valores de temperatura radiante. Los valores registrados por el sensor asumen que la tierra se comporta como un cuerpo negro, es decir, que tiene una emisividad espectral de 1. Se asume además que en el valor registrado se encuentra la contribución energética de la atmósfera. Utilizando factores de calibración pre-lanzamiento y mediante la siguiente fórmula se pueden obtener temperaturas:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\text{sensor}}} + 1\right)};$$

Donde:

$T$ : Temperatura radiada registrada por el sensor. Unidades: °K.

$K_2$ : Constante de calibración. Unidades: °K.

$K_1$ : Constante de calibración. Unidades:  $\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}$ .

$L_{\text{sensor}}$ : Radiancia espectral registrada en el sensor. Unidades:  $\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}$ .

### 2.2.5 Correcciones radiométricas aplicadas a imágenes capturadas por otros sensores multispectrales y sensores hiperespectrales.

En este apartado se van a estudiar las correcciones radiométricas aplicadas a los sensores ASTER e Hyperion.

- Calibración sensores ASTER. Se distinguen diferentes procesos de calibración: el tratamiento radiométrico aplicado a los sensores que registran en el visible, infrarrojo próximo e infrarrojo medio, y el tratamiento aplicado al sensor que registra en el infrarrojo térmico.

El primero de ellos consta de las siguientes fases.

- I. Calibración pre-puesta en órbita (Thomes y otros, 2000): en esta fase, previa al lanzamiento del satélite, se ajustan los sistemas de calibración interna que llevará a bordo la plataforma espacial. Dicha calibración interna es muy similar a la descrita en el apartado anterior para el sensor TM. Mediante el registro de la energía proveniente de las fuentes de iluminación, así como de excitancia radiante radiada por referencias que funcionan como cuerpos negros a bajas temperaturas, se obtienen valores para el sensor que registra en el visible y en el infrarrojo próximo, y valores para el sensor que registra en el infrarrojo medio. Este mismo proceso se repitió para los sistemas de calibración interna (los cuales consisten fundamentalmente en dos fuentes de radiación correspondientes a los dominios espectrales de registro de cada sensor), y se calcularon los

coeficientes de calibración radiométrica para cada banda de registro. También se calculan la función de transferencia de modulación para los sistemas de calibración interna. Para el cálculo de dicha función utilizan un sistema de colimación controlado (unidireccional), además de un sistema de iluminación difuso que pasaba a través de los respectivos sensores (los sensores se encontraban en su máxima apertura).

- II. Calibración con plataforma espacial en órbita: dado que el sistema de calibración previo a la puesta en órbita del satélite se podría ver afectado por múltiples variables se introducen sendos sistemas de calibración interna a bordo del satélite. Dichos sistemas son diferentes para el sensor que registra en la región del visible y del infrarrojo próximo, y para el sensor que registra en el infrarrojo térmico. Para el primero se define un sistema que cuenta con: fuente de iluminación, sistema de monitorización todo ello ensamblado con el sistema óptico de calibración del sensor. Para el segundo no se dispone de pantalla de monitorización. En la siguiente imagen se establece el flujo de captura y calibración de datos, para los sensores antes mencionados.

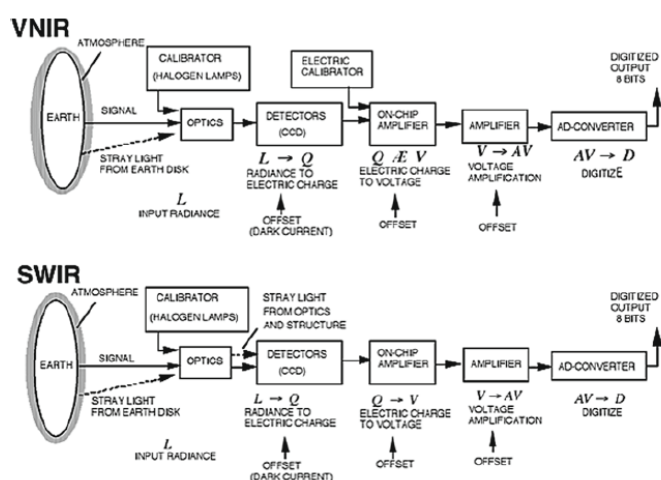


Figura 40: sistema de observación, registro y calibración para los sensores ASTER que registran en: visible e infrarrojo próximo (imagen superior) e infrarrojo medio (imagen inferior). Fuente: Hiroyuki Fujisada, Terra ASTER Instrument Design and Geometry.

El objetivo de la calibración a bordo es generar nuevos coeficientes de ganancia y sesgo que se ajusten a las variaciones que se produzcan en la respuesta espectral a lo largo del tiempo. Como se puede deducir, la calibración interna es de peor calidad que la calibración pre-puesta en órbita; basta con considerar la ley de propagación de varianzas y

*covarianzas*. El cálculo de coeficientes se desarrolla para cada 33 días (en los inicios del programa el cálculo se realizaba cada 17 días). En el artículo de Kohei Arai, Thomes, Iwasaki, (2000) y otros se establece la precisión que se espera para estos sensores.

- III. Calibración indirecta (*vicarius*): el fundamento es exactamente el mismo que se utiliza para la calibración post-lanzamiento para los sensores multispectrales.

El segundo de los métodos de calibración a bordo del satélite consiste básicamente en las mismas fases planteadas anteriormente, pero las referencias no son fuentes de iluminación sino cuerpos negros a temperaturas controladas. En la siguiente imagen se establece el flujo de captura, calibración y almacenamiento.

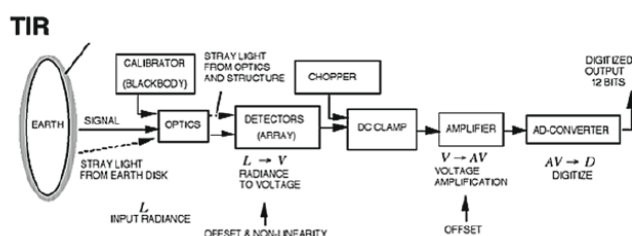


Figura 41: sistema de observación, registro y calibración para el sensor ASTER que registran en el infrarrojo térmico. Fuente: Hiroyuki Fujisada, Terra ASTER Instrument Design and Geometry.

Además de los coeficientes de calibración radiométrica (descritos anteriormente), se debe considerar la obtención de: sesgo, fracción de ruido en reflectividad y temperatura, y la función de modulación de transferencia. Como la obtención y cálculo lo realizan los sistemas de control en tierra, que generan productos a nivel L1 (los de interés en el trabajo actual), sólo se consideran las correcciones para los datos que se encuentran en ese nivel. Una de las correcciones radiométricas que se debe realizar a las imágenes en el nivel L1, es la corrección por interferencia lumínica, conocida también como *crosstalk* (Arai y otros, 2000). Este fenómeno genera un efecto neblina en las bandas próximas a la 4. La siguiente gráfica establece la fuente de dicho error:

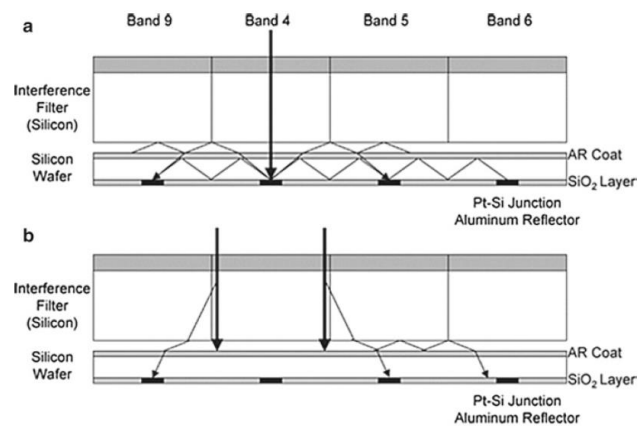
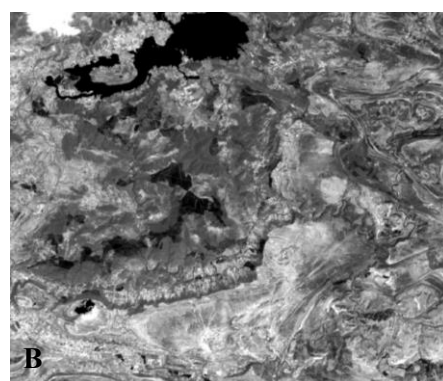
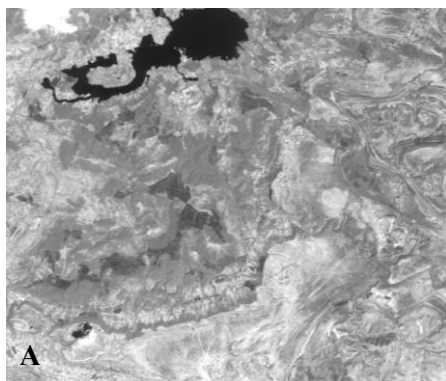


Figura 42: fenómeno de interferencia luminica por características de la banda 4. En la imagen a) Luz reflejada y posteriormente refractada en la capa de SiO<sub>2</sub>, generando un aporte energético en las bandas vecinas. En la imagen b) refracción que se produce debido al filtro de interferencia.

El fenómeno se produce en todas las bandas pero resulta significativo para la banda 4. Algunas razones pueden ser: ancho de este canal mayor que los demás (10  $\mu\text{m}$ ), así como la radiancia entrante es 5 veces mayor que en bandas vecinas. La forma de corregir la imagen de este fenómeno se puede hacer por varios métodos. Para este trabajo el modelo matemático consiste en polinomios de grado variable. En las siguientes imágenes se muestran ejemplos para distinto grado y forma de aplicar la corrección (adición o multiplicación). La elección del grado y aplicación de la corrección se realiza por procedimiento heurístico. La NASA ha creado una aplicación que corrige los datos de este fenómeno; dicha aplicación fue bautizada como SWIR y se encuentra disponible para sistema operativo Windows con arquitectura de 64 bits.



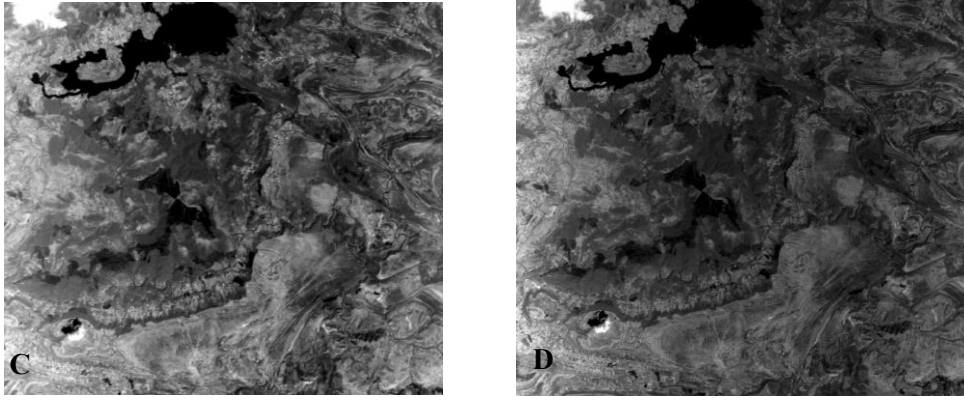


Figura 43: corrección de sub-escena del efecto crosstalk. A) Polinomio de grado 1 con corrección aditiva. B) Polinomio de grado 1 con corrección multiplicativa. C) Polinomio de grado 2 con corrección aditiva. D) Polinomio de grado 2 con corrección multiplicativa.

La combinación que mejor apariencia deja, en cuanto a homogeneidad de ND, es el polinomio de grado 1. En cuanto a forma de aplicar la corrección, se multiplica la escena por los factores obtenidos.

- Obtención de magnitudes físicas para imagen capturada por sensor ASTER. Conversión de ND a valores radiométricos. En este apartado dependiendo del nivel en el que se hayan descargado los datos se sigue un procedimiento u otro. Si el nivel de descarga de datos es el L1B se puede aplicar el mismo tratamiento que para las imágenes multiespectrales. Para niveles L1A se emplean las siguientes fórmulas:

Sensor de registro en: visible, infrarrojo próximo y medio:

$$L_{\lambda} = A \cdot \frac{V}{G} + D;$$

Donde:

$$L_{\lambda}: \text{radiancia. Unidades: } \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}.$$

$$A: \text{Coeficiente radiométrico lineal. Unidades: } \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m \cdot ND^{-1}}.$$

$V$ : Valor de ND.

$$G: \text{Ganancia. Unidades: } \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}.$$

$$D: \text{Sesgo. Unidades: } \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}.$$

Sensor de registro en el infrarrojo térmico:

$$L_{\lambda} = A \cdot V + C \cdot V^2 + D;$$

Donde:

$$C: \text{Coeficiente no lineal. Unidades: } \frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m \cdot ND^{-2}}.$$

- Calibración sensor Hyperion: la calibración pre y post lanzamiento coinciden sensiblemente con las vistas para los otros sensores TM. Lo más interesante es el uso de filtros dicróicos sofisticados así como el empleo de configuraciones electro-mecánicas especiales; para lograr un registro óptimo en el número de bandas que incorpora el sensor. Para este sensor se incorpora, además de sistemas de calibración con fuentes de iluminación propias, un sistema de calibración que utiliza la luz que le llega del Sol. Otro aspecto interesante es la existencia del fichero *Hyp\_Gain* calculado en la fase pre-puesta en órbita. Este archivo se utiliza para la generación de datos correspondientes al nivel L1. Se han realizado algunas correcciones sobre este archivo original utilizando las series temporales de calibración con el Sol como fuente de iluminación. También se han utilizado los datos de las campañas de campo para generar correcciones al archivo inicial. La zona en la que se efectuaron las campañas es el Lago Frome (Australia). Los datos registrados por el sensor tienen una precisión del 2% sobre el rango del visible e infrarrojo próximo y de 5-8% sobre el rango del infrarrojo medio. Para la obtención de magnitudes físicas son válidas las fórmulas planteadas para el sensor TM. Revisión de bandas. Este apartado se basa en la eliminación de bandas que no contienen información o que contienen algún tipo de anomalía. Algunos ejemplos del ruido se muestran en la siguiente figura.

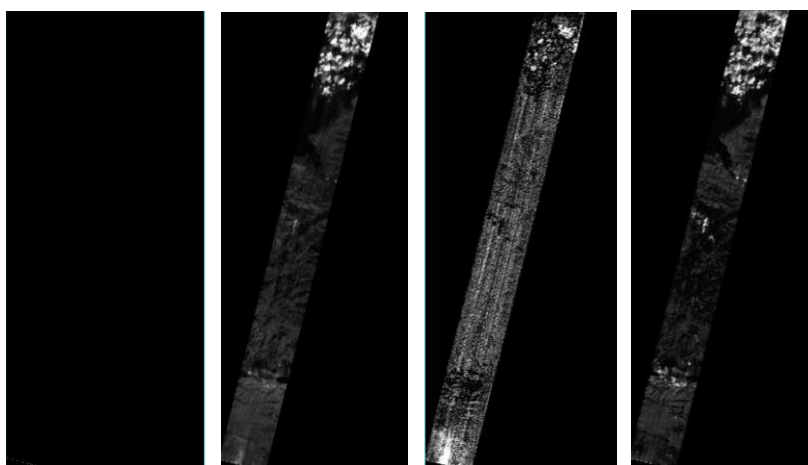


Figura 44: depuración de imágenes defectuosas sensor Hyperion. De izquierda a derecha imágenes correspondientes a las bandas: 4, 121, 166, 213.

Posterior a esta depuración se utiliza la función *Minimum Noise Fraction (MNF)*. Esta función matemática permite la reducción dimensional de imágenes hiperspectrales (mediante componentes principales) y la obtención del ruido

común a las bandas previamente depuradas. Su cálculo se describe a continuación (Green, Berman, y otros, 1988):

1. En primer lugar se aplica la transformación: *principal component analysis*. Con la aplicación de este método se consigue la separación de la señal y el ruido. Este permanece en las últimas bandas.
2. Después se estima la matriz covarianza de la señal y la matriz covarianza del ruido.
3. Seguidamente se obtiene un conjunto de componentes que contienen información ponderada sobre la varianza presente en el conjunto de datos original. El software utilizado permite la selección de componentes principales para calcular el nuevo espacio dimensional del conjunto de datos.
4. Una vez se han seleccionado las componentes principales de interés se procede al cálculo inverso de la transformación. De esta forma se mantiene el orden de dimensión del espacio inicial reduciendo gran parte del ruido.

Si la utilización de imágenes Hyperion no requiere de análisis radiométrico riguroso se puede corregir el efecto de *strip*. Así quedarían disponibles gran número de bandas de registro que corresponden a pequeños defectos en los detectores en el instante de captura.

### **2.3 Influencia atmosférica en el registro de datos**

En un supuesto ideal, en el que la atmósfera no existiera, la radiación proveniente del sol sería: parte absorbida, parte transmitida y parte reflejada por la superficie de la Tierra. Dependiendo del cuerpo en cuestión este balance irradiación-absorción-reflexión-transmisión- se podría dar en unas u otras magnitudes. Con la consideración de la atmósfera ya no es un problema entre la fuente de radiación y el objeto radiado. Se trata de un tercer elemento que se debe caracterizar, en la medida en la que sea posible, para lograr una descripción física fidedigna de la escena (siempre que se busque la caracterización de la misma en magnitudes físicas). Para lograr dicha caracterización se estudiarán los fenómenos de absorción y dispersión.

Para esta parte interesa estudiar la radiación electromagnética según la perspectiva corpuscular. Parte del número total de fotones incidentes sobre el sensor, provenientes de la radiación reflejada por un cuerpo de la superficie terrestre, se ve disminuido por los fenómenos atmosféricos citados anteriormente. Algunas referencias estiman un registro del 80% del total de fotones reflejados para la longitud de onda de  $0.85\ \mu\text{m}$ , por ejemplo (Vermote, Tanré, Deuzé, y otros, 2006). Algunos de los fotones son absorbidos por aerosoles así como por moléculas

gaseosas. La absorción la realizan principalmente:  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ . Por otra parte mientras unos fotones son absorbidos, otros son dispersados; La relación fotón-dispersión es completamente caótica en el sentido de establecer la dirección que va a seguir el mismo una vez se produce la colisión con la partícula en cuestión. Después de varios procesos de dispersión, se genera un aporte energético extra en la radiación registrada por el sensor. Dicho aporte energético genera un sesgo en la obtención de reflectividad del elemento que se trate. A continuación se estudian en mayor detalle los fenómenos de absorción y dispersión.

Fenómeno de absorción. Antes se han citado los principales agentes que realizan este proceso. De ellos sólo las moléculas  $H_2O$  y  $O_3$ , se consideran variables para la escena (definida espacialmente por latitud y longitud), así como para el instante de captura. Las demás moléculas se consideran fijas aunque mezcladas de forma heterogénea. Este fenómeno se traduce visualmente en una reflectividad de la escena muy baja, es decir, valores en ND muy bajos. Existen intervalos del espectro EM en el que la influencia de este efecto es mínima. Dichos intervalos son las ventanas atmosféricas y en las mismas se definen los diferentes dominios espectrales de cada sensor.

Fenómeno de dispersión. Este fenómeno admite sub-clasificación en dispersión selectiva y dispersión no selectiva. Dentro de los fenómenos de dispersión selectiva se encuentran los fenómenos de Rayleigh y Mie. La dispersión de Rayleigh se produce cuando la longitud de onda es mayor que el tamaño de la partícula. La dispersión de Mie se da cuando la longitud de onda y el tamaño de la partícula adquieren dimensiones similares. Los fenómenos de dispersión no selectiva se dan cuando la longitud de onda es menor que el tamaño de la partícula. Este fenómeno aporta energía que no procede de la escena de interés y se manifestará en la imagen con un aumento en el valor de los ND que componen la misma.

Estudiar y cuantificar cada fenómeno por separado no es nada riguroso. La teoría que rige el comportamiento de ambos fenómenos, estudia su multiplicidad, además de orden y magnitud, es la Transferencia Radiativa. El estudio minucioso de dicha teoría extendería considerablemente el actual trabajo; por esto, sólo se citan dos referencias que tratan el tema en profundidad. Dichas referencias son: *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing* de Charles Elachi y otros (2006) y *Radiative Transfer* de Chandrasekhar (2003).



## CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

En este capítulo se pretende establecer los flujos de trabajo seguidos para la obtención de resultados. A continuación se comenta brevemente los distintos apartados con los que cuenta el presente capítulo. En primer lugar se establece la metodología para la utilización de las imágenes; dicho proceso recibe el nombre de adecuación y validación de los datos. Después se realiza un estudio del medio físico. Este apartado es de gran importancia e interés para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado, dado que, no se realizó un reconocimiento en campo. Posteriormente se obtendrán clasificaciones para el sensor; en este apartado se utilizan distintos enfoques estadísticos, así como distintas funciones discriminantes. A continuación se computan clasificaciones de temperatura en la región de interés. Aprovechando el par simultáneo que se tiene de la imagen capturada por el sensor ASTER, se calcula el MDT de la escena registrada. Para finalizar se aplican los métodos actuales para la prospección de hidrocarburos; estos son métodos directos y métodos indirectos.

### 3.1 Validación geométrica y radiométrica

En este apartado se indican los procedimientos desarrollados para la obtención de datos adecuados a los procedimientos que siguen en los apartados posteriores.

#### 3.1.1 Validación geométrica

El siguiente diagrama de flujo indica el procedimiento realizado para la validación geométrica.

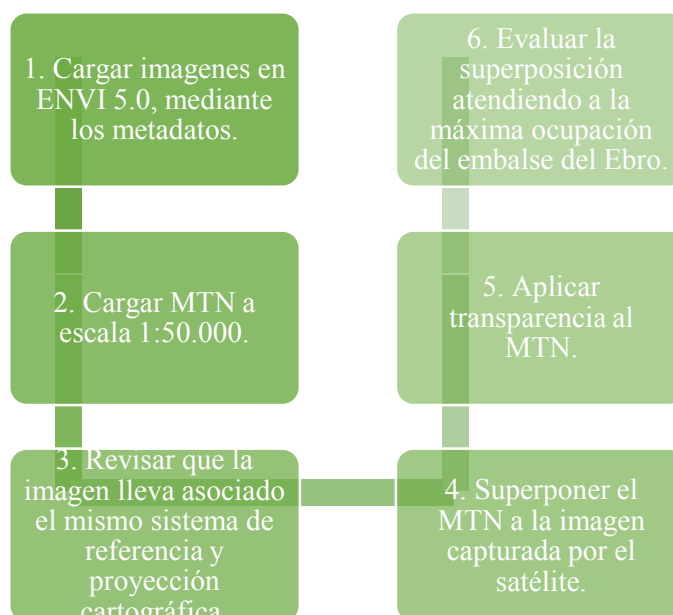
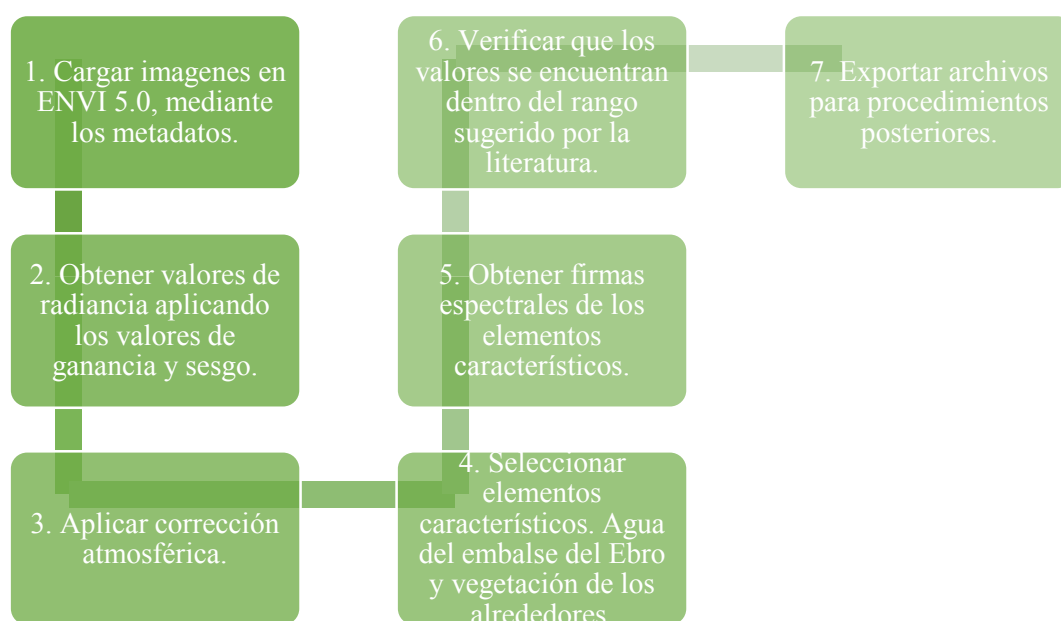


Figura 45: diagrama de flujo definido para la validación geométrica.

Dado que la resolución espacial del sensor es de 30 m, en los datos multiespectrales, se utilizará la máxima ocupación del embalse del Ebro como elemento al que el perímetro del embalse del MTN 1:50.000 ha de ajustarse. Los resultados se muestran en el capítulo 4.

### 3.1.2 Validación radiométrica

Los pasos seguidos para la obtención de reflectividad se encuentran detallados en el siguiente diagrama de flujo.



Se aprovecha el comportamiento espectral del agua del embalse. Se evita obtener firmas espectrales de las zonas próximas a las bahías o del perímetro. La curva espectral del agua debería ser monótona decreciente a medida que aumenta la longitud de onda; esto se traduce en valores altos en la región del azul, así como valores bajos en la región del infrarrojo próximo. La firma espectral teórica, o promediada, de una cubierta vegetal sana es conocida; presenta un máximo relativo en la región del espectro electromagnético correspondiente al verde, así como un crecimiento significativo en el infrarrojo próximo. Los resultados se pueden ver en el siguiente capítulo.

El paso número 3 (corrección atmosférica), se desarrolla a continuación. Una vez explicada la necesidad de efectuar una corrección atmosférica (2.3), se procede al desarrollo metodológico. Primero se van a estudiar los métodos aplicados en imágenes hiperespectrales, y posteriormente se estudiarán los aplicados a las imágenes multiespectrales.

Correcciones atmosféricas aplicadas a las imágenes capturadas por el sensor Hyperion. Los modelos de corrección que se revisan para estas imágenes son: QUAC y FLAASH. La evaluación de la bondad de la corrección se llevará a cabo por lo bien que se ajuste la firma espectral de vegetación para ese instante a la firma espectral teórica.

- FLAASH (Kaufman, Wald, y otros 1997): El método *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes* es un método de corrección atmosférica que incorpora el modelo de Transferencia Radiativa MODTRAN4, aunque dispone de más modelos. Este módulo de corrección atmosférica inicia con la obtención de radiancia espectral a nivel de píxel. La ecuación que utiliza es:

$$L = \left( \frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left( \frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a;$$

Donde:

$\rho$ : píxel de la superficie en reflectancia.

$\rho_e$ : valor medio de la superficie en reflectancia asignado a un píxel.

$S$ : albedo atmosférico.

$L_a$ : radiancia dispersada por la atmósfera.

$A$  y  $B$ : coeficientes dependientes de la geometría y de la atmósfera.

El primer término de la ecuación anterior viene de la reflectividad de la superficie de la escena. El segundo término es el aporte energético de la dispersión atmosférica del entorno próximo.

Los valores correspondientes a  $A$ ,  $B$  y  $L_a$  son determinados numéricamente mediante la resolución de la ecuación de Transferencia Radiativa (para este caso utilizando el modelo MODTRAN4). Dicha ecuación considera: inclinación solar, y del sensor, elevación media del terreno, resolución espacial del sensor y un modelo atmosférico. En el modelo atmosférico se define la cantidad de partes por millón de un determinado elemento (por ejemplo,  $\text{CO}_2$ ). Las variables  $A$ ,  $B$  y  $L_a$ , son función de la cantidad de vapor de agua que exista. Para la estimación del valor de la columna de vapor de agua, se utilizan bandas en las que se registra una influencia directa de dicho fenómeno (normalmente 1130 nm). Una vez se ha estimado la cantidad de vapor de agua se utiliza una función de propagación en la que se intenta corregir el aporte energético de los píxeles que no se encuentran sobre la línea directa de vista.

El modulo también estima la cantidad de aerosoles y de bruma presente en la escena. Esto se logra mediante la iteración de la ecuación antes planteada y constricciones en cuanto a tipo y cantidad de partículas.

- QUAC (Exelis, 2009): se trata de un método que obtiene todos los parámetros de corrección atmosférica dentro de la propia escena. El algoritmo inicia con la entrada de datos (sensor multiespectral (MSI) o hiperespectral (HSI)); obtiene de todas las bandas incorporadas píxeles oscuros, que suelen trabajar como cuerpos negros. De esta forma se construye un patrón o base utilizando los píxeles con valores de ND mínimos. Seguidamente, aplica un filtro a la vegetación (probablemente el índice de diferencia normalizada). Una vez aplicados estos filtros se realiza el cómputo de miembros extremos (la literatura sugiere que son píxeles que contienen mayor pureza). Posteriormente se aplica un filtro de brillo. Se calculan factores de sesgo y ganancia en función de los valores obtenidos en los miembros extremos. Finalmente se procede con la aplicación de los factores obtenidos. Como se puede observar el funcionamiento es idéntico a la calibración indirecta realizada por las estaciones de control en tierra, salvo la particularidad de que el reconocimiento en terreno se cambia por reconocimiento de patrones característicos en la escena (miembros extremos).

Correcciones atmosféricas aplicadas a las imágenes multiespectrales. En este apartado se realiza una distinción. En un lado se encuentran las imágenes capturadas por los sensores ASTER y OLI, y por otro lado se encuentran las imágenes capturadas por los sensores ETM+ y TM. Para los sensores ASTER y OLI se va a realizar el mismo procedimiento aplicado a las imágenes hiperespectrales, pero particularizando en el tipo de sensor. También se añade el modelo DOS en la comparación. Para los sensores ETM+ y TM se realiza una comparación entre las cuatro versiones del modelo DOS, las cuales fueron programadas en Matlab y verificadas con R.

Correcciones atmosféricas aplicadas para los sensores ASTER y OLI. Para la corrección atmosférica del sensor ASTER sólo se puede utilizar el módulo FLAASH. El módulo QUICK, así como el módulo DOS, generan perfiles espectrales que carecen de sentido; esto se debe, probablemente, a la incompatibilidad de unidades.

Para finalizar este apartado se revisarán las correcciones aplicadas a los sensores TM y ETM+. Este apartado va seguir el siguiente orden: 1. Consideraciones sobre cuándo y en qué medida aplicar las correcciones atmosféricas. 2. Métodos de corrección atmosférica para datos registrados por los sensores: TM y ETM+.

1. Consideraciones sobre cuándo y en qué medida aplicar las correcciones atmosféricas (Song y otros, 2001). La corrección atmosférica no está justificada para cualquier tratamiento de imágenes adquiridas por satélite. En concreto, se debe prescindir de este paso de pre-procesado si el objetivo es una clasificación, o una detección de cambios,

para una escena adquirida para un único instante. Para dichos supuestos es totalmente lícito el empleo de escala relativa (se puede interpretar la acción atmosférica como un sesgo que afecta a toda la imagen en la misma medida). Por ejemplo, para una única clasificación mediante el método de máxima verosimilitud, de una escena tomada para un único instante, no es necesario corregir de efectos atmosféricos. No obstante, si se quiere realizar una evaluación temporal o una caracterización física lo más rigurosa posible se debe considerar esta corrección. Para la detección de anomalías inducidas por filtraciones de hidrocarburos se puede utilizar una escala relativa; sin embargo, la obtención de valores de reflectividad de la superficie terrestre favorece una mejor discriminación de cubiertas. La utilización del módulo FLAASH permite la obtención de valores de reflectividad, pero como se ha visto a lo largo de esta sección, no es el único. Previo a la implementación de módulos de corrección atmosférica, basados en la resolución de la ecuación de Transferencia Radiativa, se desarrollaron una serie de algoritmos basados en la corrección de la escena basándose en los datos registrados dentro de la misma. En estos se encuentra el modelo DOS (*Dark Object Subtraction*), propuesto por Chavez en 1988. Dicho algoritmo es, y ha sido, ampliamente utilizado, tanto por su sencillez conceptual, como por la facilidad de implementación. El modelo especifica que existen factores que alteran el valor del ND en regiones donde se distingue un elemento que actúe como cuerpo negro (sombra o agua limpia, profunda y en reposo). El valor del ND tendería a un valor nulo, ya que un cuerpo negro absorbe toda la radiación, pero en la realidad los ND son distintos de cero para dichos cuerpos; la corrección consiste en sustraer ese valor detectado por un aparente cuerpo negro a toda la escena. La idea ha ido evolucionando hasta llegar a computarizar un modelo DOS que considera los efectos de la dispersión de Rayleigh, entre otros. Con la implementación de estos modelos se consiguen valores suficientemente buenos sin un coste computacional elevado.

2. Métodos de corrección atmosférica para datos registrados por los sensores TM y ETM+. A continuación se expone brevemente los modelos existentes a día de hoy basados en DOS. Para dicha evaluación se considera la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{\pi d^2 (L - L_{bruma})}{\tau_v (E_{sun} \cos \Theta \tau_z + E_d)};$$

Donde:

$\rho$ : reflectancia de la superficie.

$d$ : distancia Tierra – Sol.

$\tau_v$ : transmitancia en dirección de iluminación.

$\tau_z$ : transmitancia en dirección de registro.

$\Theta$ : ángulo respecto al Zenit.

$E_{sun}$ : irradiancia exoatmosférica.

$E_d$ : aporte energético por dispersión.

Unidades: especificadas en la parte de correcciones radiométricas.

$$L_{1\%} = 0.01 \frac{E_{sun} \cdot \cos\Theta}{\pi \cdot d^2};$$

$$L_{bruma} = VMI - L_{1\%};$$

Donde:

VMI: Valor mínimo inicial en unidades de radiancia.

Previo a la utilización de cualquier modelo DOS, se tiene que construir el patrón VMI. Dicho patrón se puede construir de varias formas. Una de ellas consiste en utilizar la función DOS del paquete Landsat del software estadístico R. Otra puede ser mediante el uso de la función *min* (x) en Matlab y luego multiplicando por los factores correspondientes para la obtención de radiancia. Análogamente se puede abordar mediante el estudio del histograma; se define un umbral que abarque los valores mínimos, se calcula un valor promedio y se transforma en valores de radiancia. Cualquiera de estos procedimientos es válido. En este apartado se utiliza la tabla facilitada por el software R.

- Obtención de reflectividad en superficie: Es el caso más simple de DOS. Para este caso se tiene:  $\tau_v = \tau_z = 1$ ; y  $E_d = 0 = L_{bruma}$ ; en este caso estamos en reflectividad aparente.
- Modelo DOS-1. En este caso se tiene:  $\tau_v = \tau_z = 1$ ; y  $E_d = 0$ ;  $L_{bruma} = VMI$ . Para la obtención de VMI se considera (Sarah Goslee, 2011): las bandas 5 y 7 trabajan mal porque sobreestiman los valores de  $L_{bruma}$ . Conociendo las propiedades del sensor (TM, ETM+), se introduce una banda junto con: valores de ganancia, sesgo, altura del Sol y fecha de adquisición. En función de estos datos se calculan los valores de  $L_{bruma}$  para el resto de las bandas. Este procedimiento se realiza por *prueba y error*, aunque la banda 1 ha dado buenos resultados. Luego se obtiene el valor mínimo de la búsqueda mediante la siguiente función: *min(as.numeric(names(SHV)[SHV > 1000]))*. Una vez obtenido el valor mínimo, se realiza una comparación con la tabla generada. La tabla tiene cinco columnas en la que cada columna coincide con un nivel de bruma. El valor mínimo es el de coeficiente -4, que implica una escena muy despejada, así como el valor máximo es el del coeficiente -0.5 que significa una escena muy nublada. Atendiendo a esta clasificación se distinguen las siguientes categorías (Chavez, 1989) :

- VMI<ND (55). Corresponde con un coeficiente igual a -4 (muy despejado).
- VMI=ND (56-75). Corresponde con un coeficiente igual a -2 (despejado).
- VMI=ND (76-95). Corresponde con un coeficiente igual a -1 (moderado).
- VMI= ND (96-115). Corresponde con un coeficiente igual a -0.7 (nublado).
- VMI> ND (115). Corresponde con un coeficiente igual a -0.5 (muy nublado).

La forma de proceder es obtener el valor mínimo, por ejemplo 84, e ir a la tabla. En este ejemplo correspondería el coeficiente -1 y se trata de unas condiciones de neblina moderadas. Existe un coeficiente para cada una de las bandas. Luego se debe prestar atención a la banda que se está corrigiendo en ese instante. Una vez obtenido el VMI se resuelven las ecuaciones planteadas anteriormente y se obtiene la imagen en valores de reflectividad. En este modelo se supone: pérdida en transmitancia nula, y ningún aporte por irradiancia difusa.

- Modelo DOS-2 o COSTZ. En este modelo se tiene:  $\tau_v = 1$ ;  $\tau_z = \cos \theta$ ; y  $E_d = 0$ ;  $L_{bruma} = VMI$ . La transmitancia en la dirección de la fuente de iluminación coincide con el coseno del ángulo comprendido entre el Sol y el Zénit para el instante de registro. Los metadatos facilitan la inclinación del Sol sobre el horizonte del lugar. La transmitancia en la dirección de registro es igual a 1, puesto que, el satélite se encuentra en el zénit. En este modelo no se considera el aporte por irradiancia difusa de la atmósfera.
- Modelo DOS-3. Este modelo considera el aporte energético extra de irradiancia difusa, transmitancia según la dirección del haz procedente de la fuente de iluminación y transmitancia según la dirección del haz procedente de la superficie de la Tierra registrado en el sensor. En este caso las variables están definidas por las siguientes funciones:

$$\tau_v = e^{-\tau_{ray}};$$

$$\tau_z = e^{-\frac{\tau_{ray}}{\cos \theta}};$$

$$E_d = \tau_{ray} = 0.008569 \cdot \lambda^{-4} (1 + 0.0113 \cdot \lambda^{-2} + 0.00013 \cdot \lambda^{-4});$$

Las funciones definidas previamente, responden a una solución particular del modelo de Transferencia Radiativa (considerando sólo la componente de dispersión de Rayleigh) 6S (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum*) (Kaufman, 1989).

- DOS-4. Este modelo incluye lo expuesto anteriormente para el modelo DOS-3 más la componente atmosférica de absorción. La constricción en este modelo se

encuentra en la particularidad de radiancia atmosférica; se considera de tipo isotrópica. En este caso las variables quedan definidas por:

$$\tau = -\cos\theta \cdot \ln \left( 1 - \frac{4\pi(\text{Gain} \cdot DN_{\min} + \text{Bias} - 0.01(E_{\text{sun}} \cos\theta \tau_z + E_d) \cdot \frac{\tau_v}{\pi})}{E_{\text{sun}} \cos\theta} \right);$$
$$\tau_v = e^{-\tau};$$
$$\tau_z = e^{-\frac{\tau}{\cos\theta}};$$

Este modelo se trata de un algoritmo iterativo que finaliza cuando se estabiliza el valor de  $\tau$  (normalmente entre 4 a 7 iteraciones). Para inicializar el algoritmo los parámetros  $\tau_v$  y  $\tau_z = 1$ . Este último caso se puede entender como una solución de la ecuación de Transferencia Radiativa que considera los fenómenos de absorción y de dispersión.

### 3.2 Estudio del medio físico

En este apartado se pretende caracterizar el medio físico; para dicha caracterización se hará una síntesis sobre geomorfología y geología del terreno, climatología, suelos y vegetación e hidrogeología. La evaluación del medio físico se realiza para la región de interés, definida en torno a los campos petrolíferos de Ayoluengo y denominada como zona 1. Esta evaluación tendrá la profundidad y el alcance, que se ajuste a los sistemas de observación utilizados (resolución espacial y resolución espectral). Finalmente en esta sección se pretende abordar el problema de la caracterización del medio físico en la medida en que está influido por fugas de hidrocarburos, así como la detección directa por índice espectral.

#### 3.2.1 Región de interés

La cuenca Vasco-Cantábrica, y en particular su parte suroccidental, constituye una zona clásica en la exploración petrolífera en España. De todos los descubrimientos realizados hasta la actualidad, sólo la estructura que presenta el campo de Ayoluengo, descubierta a mediados del año 1963, ha sido económicamente rentable y ha producido cantidades significativas de crudo (Quesada, Robles y otros, 1996). En la siguiente imagen se muestra un mapa geológico simplificado del sector suroccidental de la cuenca Vasco-Cantábrica (en él se señala la situación del campo de Ayoluengo).



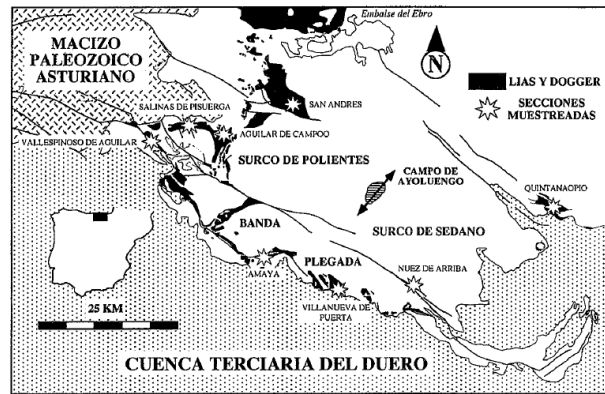
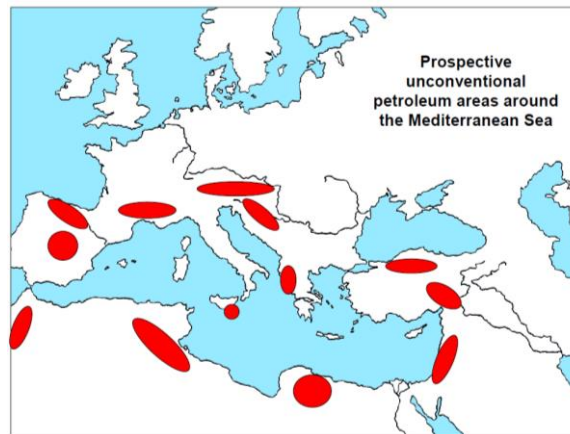


Figura 46: mapa geológico simplificado del sector suroccidental de la cuenca Vasco-Cantábrica mostrando la situación del campo de Ayoluengo. Cuenca alta del Ebro. Fuente: Quesada, Robles y otros, 1996.

Por otro lado, Fivos Spathopoulos realizó un estudio sobre manifestaciones de hidrocarburos en superficie; en dicho estudio se establecieron áreas dónde localizar hidrocarburos en Europa. Además de añadir los resultados de las campañas realizadas, en su publicación, *Unconventional Petroleum Plays in the Mediterranean Basins*, muestra dos mapas que se consideran de interés para el actual trabajo. En el primero de ellos muestra la relación entre la roca madre y el tipo de yacimiento (figura 47). En el segundo de ellos establece zonas no comunes con alto potencial para la prospección de hidrocarburos (figura 48).



Figura 47: distribución de roca madre vinculada a yacimientos de hidrocarburos en la cuenca Mediterránea. Fuente: *Unconventional Petroleum Plays in the Mediterranean Basins*, Spathopoulos.



*Figura 48: zonas no convencionales con potencial de encontrar reservas de hidrocarburos. Fuente: Unconventional Petroleum Plays in the Mediterranean Basins, Spathopoulos.*

Mediante el análisis de estas, y otras publicaciones, se decide que es un excelente dominio espacial en el que se pueden aplicar algunos de los procesos de la Teledetección. En función de esto se divide el estudio en las siguientes zonas:

1. Zona de Ayoluengo y Embalse del Ebro. Para estas zonas se utilizan imágenes multiespectrales capturadas por los sensores TM, ETM+, OLI y ASTER. La zona de Ayoluengo, el Embalse del Ebro, las Montañas de Burgos y sus alrededores se agrupan en lo que a partir de ahora se referencia como zona 1.
2. Zonas inmediatamente próximas a la zona 1. Dado que no se disponen de imágenes capturadas por el sensor Hyperion que pertenezcan a la zona de 1, se buscaron las imágenes más próximas a la misma. La cobertura de dichas imágenes, en conjunto, se denomina zona 2.

A continuación se describen las zonas de estudio. De la zona 2 no se va a realizar una descripción del medio físico, puesto que, las áreas comprendidas por dicha zona se consideran de prueba para ejecutar los algoritmos establecidos en el estado del arte.

Como se estableció antes se distinguen dos zonas en función del tipo de sensor (hiperespectral y multiespectral). Para el tratamiento multiespectral se define un área mediante las siguientes coordenadas:

- Esquina superior izquierda:  $\varphi=43^{\circ}02'10''$ ;  $\lambda=4^{\circ}07'23''$ .
- Esquina inferior derecha:  $\varphi=42^{\circ}40'29''$ ;  $\lambda=3^{\circ}32'32''$ .

En la siguiente imagen se muestra las diferentes provincias que contienen parte de la subescena.

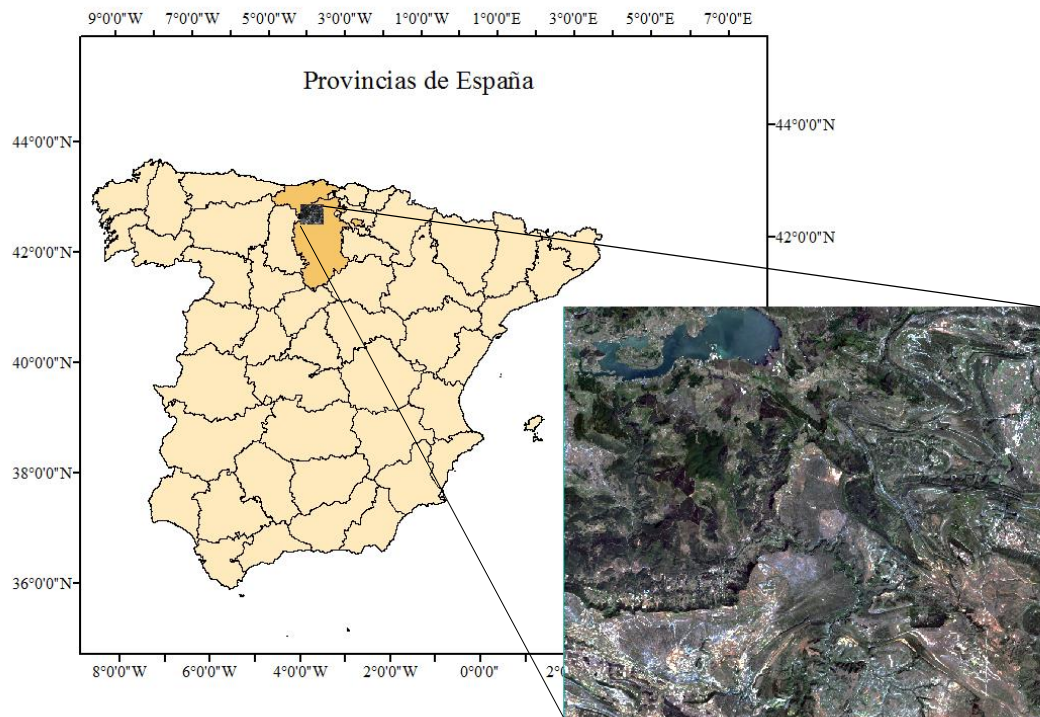


Figura 49: Provincias que contienen parte de la sub-escena. Escala mapa: 1:800.000. Edición cartográfica: propia.

Como se puede apreciar en el mapa, la sub-escena pertenece a las provincias de: Cantabria y Burgos. Cantabria pertenece a la Comunidad Autónoma de Cantabria, mientras que Burgos pertenece a la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Ambas comunidades autónomas se encuentran bajo la jurisdicción del Estado español.

En el estudio se habría podido reducir más la zona de interés, pero se definió de esta manera para aprovechar las características espectrales del embalse.

Las zonas de interés para las imágenes hiperespectrales se pueden ver en la siguiente ilustración.

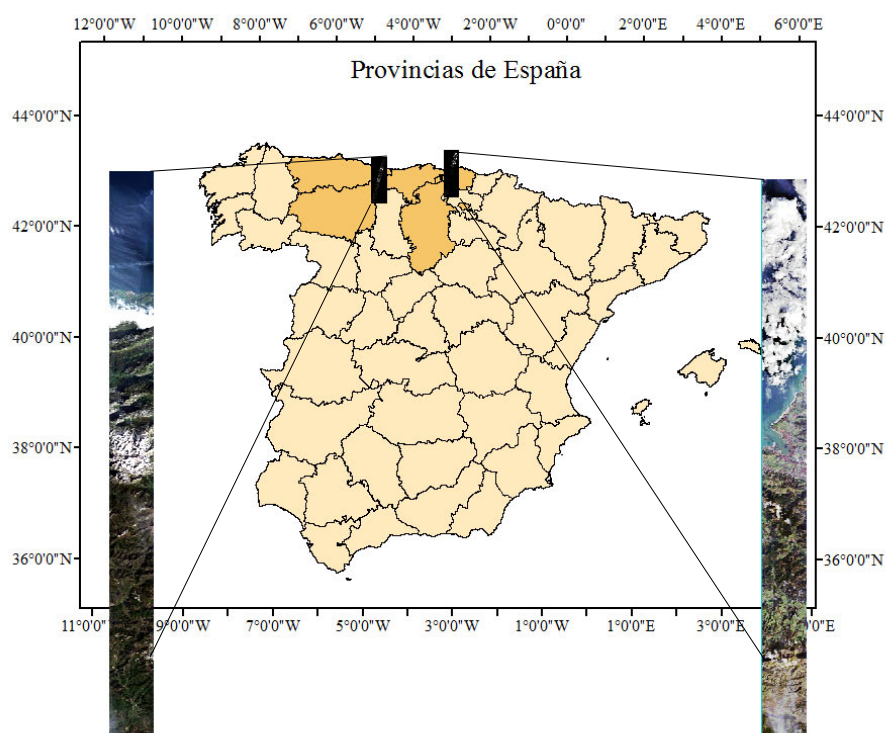


Figura 50: zonas de interés para datos hiperspectrales. Escala mapa: 1:800.000. Edición cartográfica: propia.

Las imágenes pertenecen a las siguientes provincias: Cantabria, Asturias y León (imagen izquierda al oeste de la zona de interés), Cantabria, Bizkaia y Burgos (imagen derecha al este de la zona de interés).

Para finalizar este apartado se adjuntan fotografías que se consideraron significativas, de elementos de interés que componen la sub-escena 1 (zona 1). Dado que fue imposible hacer un reconocimiento del lugar *in situ*, se descargaron las imágenes de Google Earth.





Figura 51: fotografías pertenecientes a lugares de la sub-escena 1 (zona 1). Fuente: Google Earth.

### 3.2.2 Geología y geomorfología de la zona de interés 1

Para el estudio de la geología y geomorfología de la zona 1 se va a considerar como fuentes: cartografía general presentada por el Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000 y segunda serie cartográfica MAGNA (de carácter geológico) a escala 1:50.000.

Análisis del Mapa Topográfico Nacional 1:50.000. En este estudio se pretende caracterizar los fenómenos más importantes que se dan en la región de interés. Dichos fenómenos pueden ser enunciados como: núcleos de población y vías de acceso, formas del relieve, uso del suelo y elementos característicos.

La zona 1 comprende las hojas del MTN 1:50.000: 83, 84, 108, 109, 134 y 135. Dado que los campos petrolíferos de Ayoluengo se encuentran en las hojas 134 y 135, sólo se analizarán los elementos de interés presentes en dichas hojas. Como uno de los objetivos es la identificación de una zona alterada por medio de filtraciones de hidrocarburos, resulta necesario centrar el análisis en torno al yacimiento en cuestión, que en este caso es el de Ayoluengo.

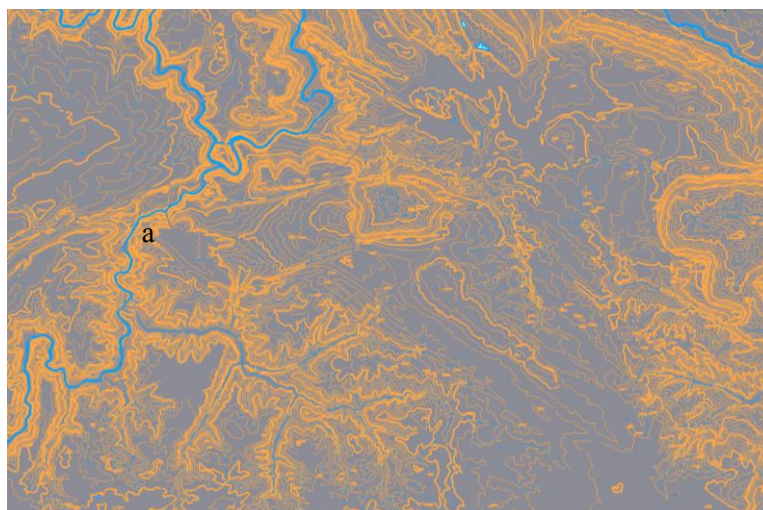
Principales núcleos de población y vías de acceso. Se distinguen en la hoja 134 los siguientes núcleos de población: Sargentos de la Lora, Valdeajos, Ayoluengo, Polientes, Salcedo, y otros. En esta parte se incluyen los más importantes, ya sea por su cercanía al campo petrolífero de interés, o por sus dimensiones. Es interesante matizar la presencia de numerosos núcleos de población en las áreas próximas al río Ebro (figura 52).



Páramo de la Lora de Valdivia (al oeste), Páramo de la Lora (zona central) y Sargentos de la Lora (al este). Dentro del páramo se distinguen regiones donde se localizan otras formas de relieve como cerros de altura variable. Dentro de la hoja 134, la altura máxima se encuentra en los 1362m (Peña Amaya), así como la mínima se encuentra en torno a unos 650 m; ambas respecto al datum altimétrico oficial (nivel medio del mar en Alicante). Se distingue en el páramo una zona de curvas de nivel muy juntas que indican una pendiente muy pronunciada (perímetro del páramo y cañones del Ebro), así como una zona de pendiente más suave (zona meridional del páramo central). Dentro del mismo se distinguen cerros o montes distribuidos de forma heterogénea; por ejemplo, Casito Alto (vértice geodésico 1094). La zona norte de la hoja presenta un relieve marcado por la red de drenaje, la cual es responsable de las incisiones que da lugar a valles de distinta tipología; esto resulta de interés en las posteriores clasificaciones por el aporte sedimentario que tiene una reflectividad bastante alta, entre otras características. En las zonas próximas al río se distingue un tipo de morfología llana o aterrazada. Dicha morfología corresponde al arrastre y depósito de los materiales transportados por el río. Se puede ver en la parte noreste de la hoja un sector denominado como La Vega; este topónimo se suele asignar cuando el tipo de configuración hídrica es lineal. Se pueden ver otras formas morfográficas singulares como son las cárcavas (también rotuladas en el mapa); estas formas se encuentran en el sector noroeste respecto del núcleo de población de Valdeajos. Finalmente, en el extremo suroeste de la hoja se distinguen alineaciones montañosas alargadas, encajadas a su vez por la red hídrica. Como conclusión se puede establecer que la red hídrica de la zona es responsable de gran parte de los procesos de erosión que dan forma al relieve.

Respecto a la hidrografía destaca la imperante presencia del río Ebro. El patrón de drenaje es de tipo dendrítico. Respecto a la geometría que describe su cauce, se trata de un río con traza sinuosa en el que se localizan varios meandros (formas sinuosas más pronunciadas). En la zona norte y sur de esta hoja, se ve como la escorrentía superficial da lugar a valles; se evidencia una dirección noroeste-sureste, la cual es causa de la tectónica regional. No se evidencia la presencia de islas ni de bancos de sedimentos a lo largo de la traza del río, pese a la forma del mismo. Se debe considerar que para este análisis se cuenta con una equidistancia de 20 m, y por este motivo, puede que, existan fenómenos no representados pero existentes.





*Figura 54: altimetría e hidrografía de la hoja 135 en formato vectorial del MTN 1:50.000. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.*

En la zona noroeste de la hoja 135 destaca el cañón, hoz o desfiladero del Ebro. Es interesante el cambio que tiene el relieve cuando el río Ebro pasa de la zona septentrional del páramo a su paso por valles encajados que rodean el perímetro del páramo en su situación noreste-este. Se muestra también el río Rudrón que confluye en el Ebro. Previo a su desembocadura en el Ebro, se ve la convergencia con el río Sedano. Las pendientes acusadas, en el valle de Sedano, se traducen en una capacidad erosiva importante; este fenómeno se da a lo largo del cañón del Ebro-Rudrón (a). Por la forma en la que se disponen las vertientes al paso de los ríos Ebro y Rudrón se pueden clasificar los meandros encajados según la interpretación davisiana; es decir, vertientes simétricas.

La disposición de las curvas de nivel sugiere zonas de pendientes abruptas, así como tajos profundos generados por las diferentes formas de escorrentía en superficie; estos tajos pueden servir para diferenciar la litología existente en la zona, lo cual servirá para establecer las distintas clases espectrales que componen la zona 1.

Usos del suelo según el MTN 1:50.000. El suelo del páramo está clasificado en las siguientes zonas: monte, pradera, monte bajo matorral, terreno claro con montes. En las proximidades a los núcleos urbanos y a los ríos principales se encuentran los siguientes tipos de suelo: regadío, monte bajo matorral y terreno claro. En las zonas próximas a los valles encajados los suelos son catalogados como: pradera, y terreno claro con árboles.

Elementos característicos. Se consideran elementos de interés para el presente proyecto minas y canteras. Además de los campos petrolíferos de Ayoluengo, se ven minas de arena y caliza en las proximidades de los mismos. En la zona oeste de la hoja 134, cerca del núcleo de población Basconcillos del Tozo, se encuentran minas de arcilla caolinítica y arena. En la zona sureste respecto de Polientes se encuentra una mina de grava. Se prestará atención a la respuesta



espectral registrada por los sensores para evaluar el tipo de material y su probabilidad de estar influido por la presencia del campo petrolífero de Ayoluengo.

Análisis Mapa Geológico 1:50.000 correspondiente a la segunda serie MAGNA. Para el desarrollo de esta parte se cuenta con apoyo, fundamentalmente, de las siguientes publicaciones: Memoria explicativa hoja 134 y 135 (Polientes y Sedano respectivamente), así como cartografía geológica, elaborada por el Departamento de Explotación y Minas de la Universidad de Oviedo. “Dinámica de un espacio natural: los cañones calcáreos del Ebro (Burgos)”, Memoria de Licenciatura presentada por Raquel González Pellejero. Para demás consideraciones se cita la referencia concreta.

1. Contexto geológico-fisiográfico. La cuenca vertiente del Alto Ebro organiza la escorrentía de la mayor parte de un territorio que se conoce históricamente como Las Montañas de Burgos (Valcarcel, 1974). Se trata de un área de montaña media del dominio plegado cantábrico. En la siguiente imagen se pueden distinguir las diferentes unidades morfoestructurales que lindan con la zona de análisis definida previamente como 1.

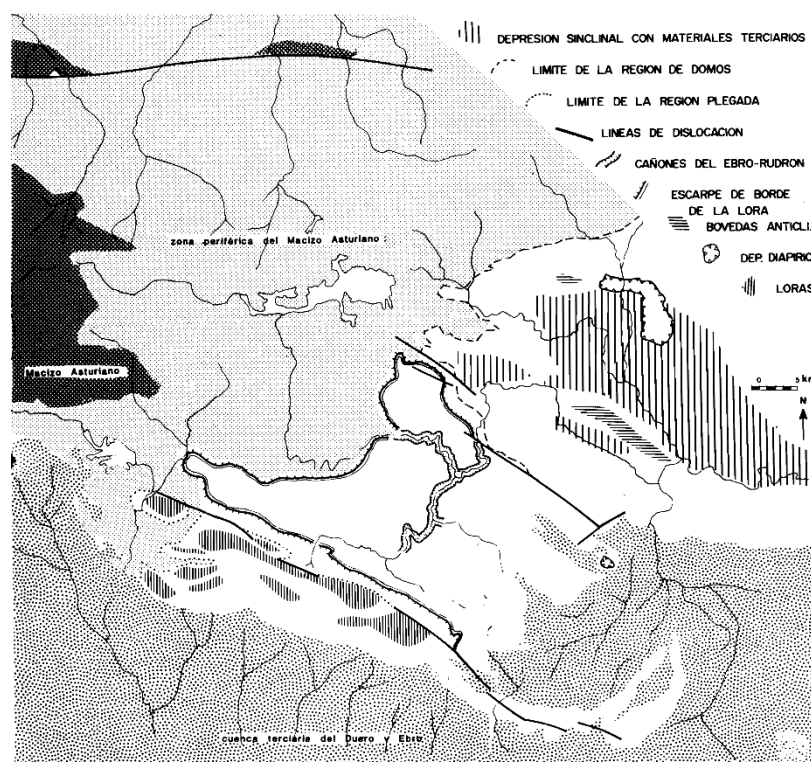


Figura 55: unidades morfoestructurales que lindan con la zona 1- Fuente: *Dinámica de un espacio natural: los cañones calcáreos del Ebro (Burgos)*, Memoria de Licenciatura presentada por Raquel González Pellejero.

La unidad más occidental corresponde a la zona periférica del Macizo Asturiano. Se trata de una aureola de sedimentos que desde el permotrias<sup>5</sup> al wealdense<sup>6</sup> envuelven por el este al mismo. La gran extensión de la facies weáldica la convierte en la más representativa de esta unidad, al tiempo que la escasa consistencia de los materiales detríticos (areniscas y arenas) generan unas formas de relieve poco contrastadas. Esta peculiaridad permite establecer una clara diferenciación entre esta unidad weáldica y sus vecinas (zona 1) calcárea. La región de domos se trata de una unidad plegada en materiales mesozoicos y terciarios. La estructura de mayor desarrollo de la unidad es el gran anticlinal de Villarcayo. La naturaleza litológica del conjunto, caracterizada por la alternancia de materiales coherentes (calizas sobre todo) y menos consistentes (margas y arcillas), proporciona formas de relieve características al producirse un desmantelamiento diferencial según la naturaleza del roquedo, generando un modelo tabular. La zona 1 corresponde a altas plataformas o paramera de la Lora. Caracterizadas por la presencia de amplias superficies subhorizontales en niveles calcáreos del Turoniense y del Santoniense (dichos niveles son pisos que pertenecen a la época o serie tardía del Sistema Cretácico). Se localiza el sinclinal de Lora de Valdivia-Sedano. Los materiales calcáreos alternantes constituyen el elemento fundamental del paisaje morfológico al permitir el desarrollo de amplias cornisas rocosas que cintean el conjunto (figura 56).

---

<sup>5</sup> Permotrias: Sistema Pérmico y Triásico considerados en conjunto.

<sup>6</sup> Wealdense: Nombre que se da a una secuencia de depósitos pre-Cretácico. Está formado por dos unidades sedimentarias mayores: Capas de Hasting y grupo de la arcilla de Weald. La primera es la unidad inferior y es más arenosa, mientras que la última está dominada por el fango.

---

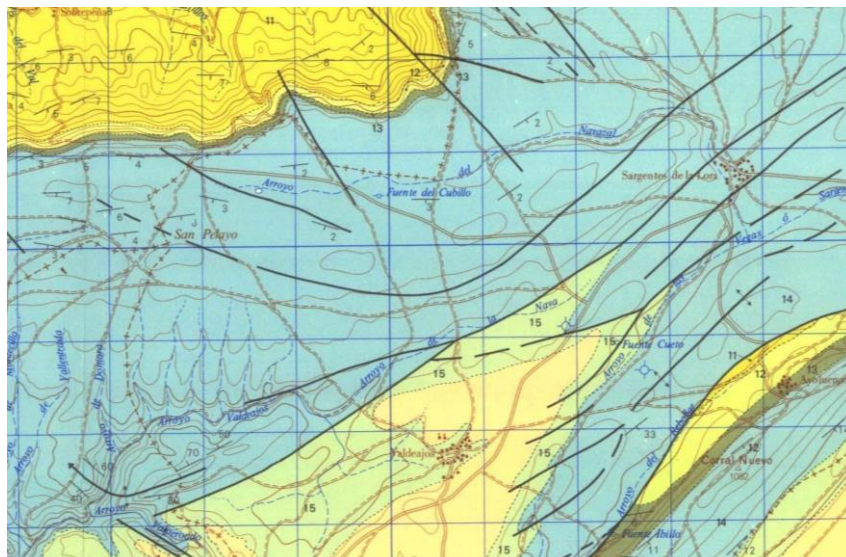


Figura 56: recorte mapa geológico hoja 134 (Polientes). 11. Conglomerados silíceos en la base, arenas blancas caoliníferas, gravas con estratificaciones cruzadas y arcillas grises y negras 12. Arenas blancas, arcillas grises y negras con pasada de calizas arenosas. 13. Margas arenosas gris-blancuecinas. 14. Caliza de diferente tipología. 15. Margas calcáreas y calizas arenosas. Fuente: IGME.

El límite meridional de la paramera de la Lora lo constituye la región plegada<sup>7</sup>. Esta estrecha franja, caracterizada por su relieve inverso, pone en contacto la vertiente meridional de la Cordillera Cantábrica en su sector central con la cuenca sedimentaria del Duero. Finalmente el sector más oriental de la cuenca alta del Ebro, en su sector meridional, pertenece a La Bureba. Esta unidad tiene estructura de cuenca sedimentaria, actuando como nexo de unión, o estrecho de Burgos, entre la cuenca sedimentaria del Ebro y la del Duero. La gran extensión de materiales terciarios (yesos, arcillas y calizas) se traduce en un relieve menos contrastado que en las unidades anteriores. El término regional “lora”, hace referencia a esos potentes banales calizos, con frecuencia limitados por escarpes y con una superficie superior más o menos llana.

2. Contexto morfoestructural y litológico. Identificación de las distintas unidades estructurales (figura 57).

<sup>7</sup> Región plegada: comarca de Las Loras, diferente de la paramera de la Lora, donde la paramera constituye por su estructura geológica y su significado geomorfológico una unidad aparte.

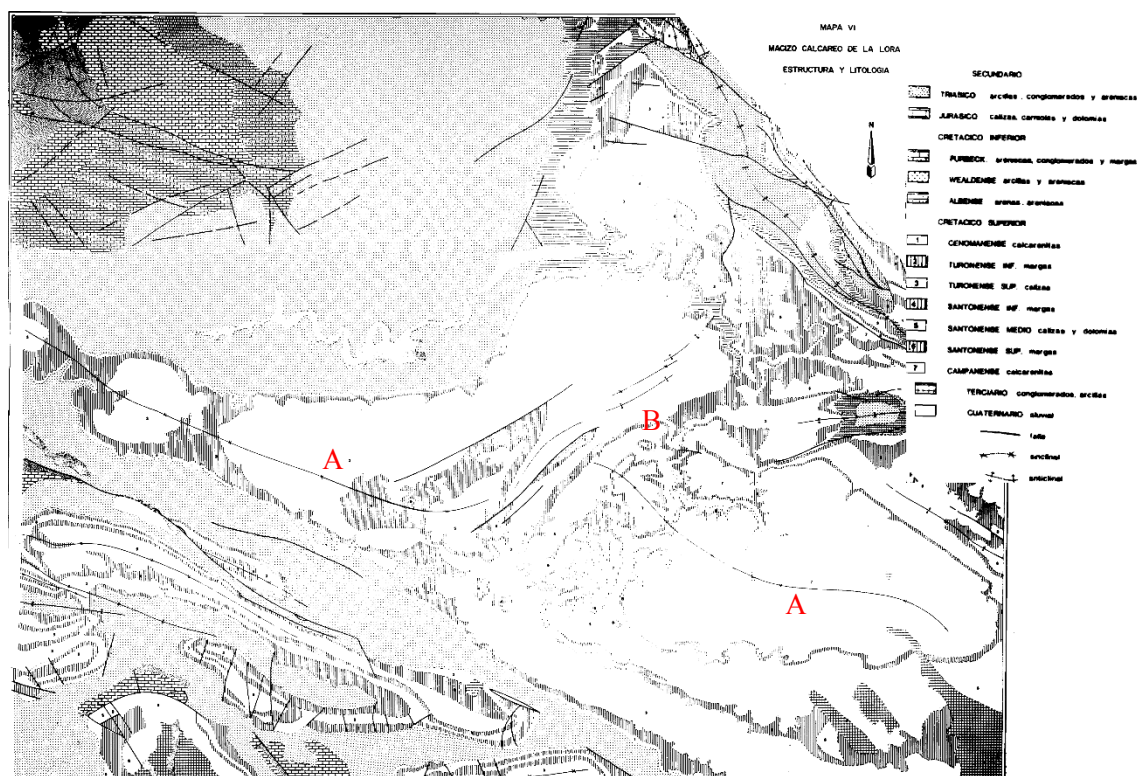


Figura 57: macizo calcáreo de la Lora. Estructura y litología. Fuente: *Dinámica de un espacio natural: los cañones calcáreos del Ebro (Burgos)*, Memoria de Licenciatura presentada por: Raquel González Pellejero.

- A) Sinclinal Lora de Valdivia-Sedano. Morfoestructura de dimensiones considerables aunque de flancos tendidos. Dirección: este-noroeste.
- B) Anticlinal de Ayoluengo. Dirección: noreste-suroeste. En la misma dirección se encuentra un sinclinal, próximo a Sargentos de la Lora, y un anticlinal que llega hasta el cañón del Ebro. Dado el interés que tiene el anticlinal de Ayoluengo se muestra el siguiente corte geológico.

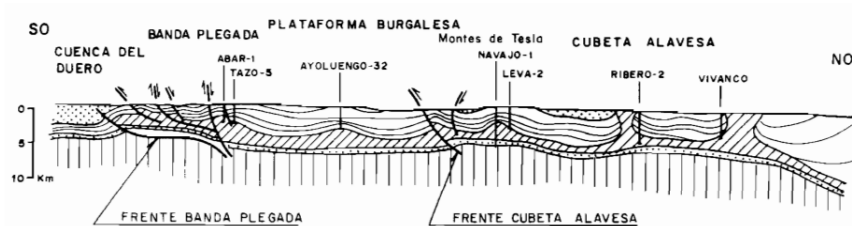


Figura 58: corte geológico a la plataforma burgalesa. Fuente: Memoria hoja 134 segunda serie MAGNA, IGME.

En el corte geológico se evidencia el anticlinal de Ayoluengo (no se percibe muy pronunciado), pero en donde destacan sucesivas líneas de fractura. Estas líneas de fractura se traducen en fallas normales con dirección noroeste según la dirección del corte (SO-NO). Por lo comentado anteriormente y lo revisado en el estado del arte se

encuentran dos relaciones con los mismos. La primera es la localización de un anticlinal y la segunda es la presencia de fallas que indican posibles mecanismos que favorecen la migración de hidrocarburos de su reserva madre a superficie.

La Lora coincide, en un conjunto, con un bloque de zócalo bien delimitado (hoja 134 segunda serie MAGNA). La paramera de la Lora se encuentra coronada por un caparazón de materiales cretácicos (caliza wackestone, arenosa con estratificación cruzada, caliza grainstone y caliza biconstruida). En la misma disposición subhorizontal se encuentran los siguientes materiales: conglomerados silíceos en la base, arenas blancas caoliníferas, gravas con estratificaciones cruzadas y arcillas grises y negras. También se localizan areniscas con estratificaciones cruzadas, areniscas microconglomeráticas y arcillas. La existencia de potentes series calcáreas ha permitido el desarrollo de valles estrechos y la competencia diferencial de los materiales ha dado lugar a formas de vertiente específicas. Se prestará atención a la clasificación mineral que se va a realizar utilizando las imágenes capturadas por el sensor ASTER para la identificación de algunas formaciones aquí comentadas.

El material que compone las distintas formaciones es calizas y dolomías, como se aprecia en las siguientes imágenes.

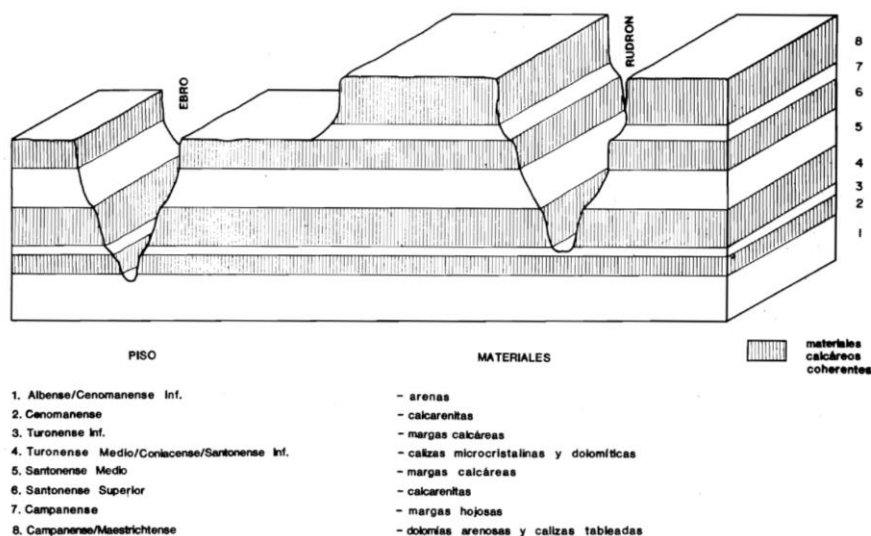


Figura 59: materiales atravesados por los ríos Ebro y Rudrón. Fuente: *Dinámica de un espacio natural: los cañones calcáreos del Ebro (Burgos)*, Memoria de Licenciatura presentada por: Raquel González Pellejero.





*Figura 60: fotografía de un meandro perteneciente al cañón del río Ebro (La Hoz de la Hundida). Fuente: Félix Fernández Rodríguez.*

### **3.2.3 Climatología**

Este apartado se va a estudiar según dos perspectivas. En primer lugar se hace un estudio de la climatología considerando la geomorfología de la zona 1; también se cuenta con datos de temperatura del aire y precipitaciones registrados en Sargentos de la Lora y suministrados por el Ministerio de Agricultura. En segundo lugar se establece una clasificación atendiendo al atlas de precipitaciones y temperaturas provisto por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Variaciones climáticas zona 1. La zona 1 linda en dirección norte con la vertiente meridional de la Cordillera Cantábrica. El área supone una franja de transición climática entre lo que se denomina España atlántica (más húmeda) y España Mediterránea (más seca). A medida que se avanza en la dirección sureste, desde la vertiente meridional de la Cordillera Cantábrica, disminuyen las precipitaciones. También, existe una reducción de humedad en la dirección antes mencionada.

El sistema montañoso cantábrico está configurado de forma que obliga a ascender las masas de aire o vientos oceánicos, los cuales penetran la península por el litoral cantábrico. Esta influencia atlántica se traduce en un registro de altas precipitaciones así como un aumento de la humedad. Más al sur destaca la configuración de carácter continental, luego parece lógico suponer que se producen precipitaciones en distinto grado; menor a medida que disminuye la latitud. Por otro lado, la paramera de la Lora, al encontrarse desabrigada, es susceptible de vientos fuertes. Estos vientos pueden regular tanto la temperatura como la humedad. Es probable que los valles encajados que se encuentran en la zona presenten diferencias térmicas respecto de la paramera (por su situación abrigada). En el trabajo de Raquel González se hizo una campaña de observación de datos térmicos. En el mismo se registró que las temperaturas mínimas y máximas son más

elevadas en el fondo de los valles que en la plataforma (en torno a 1-2°). A continuación se cita un extracto del mismo: “...*Estas diferencias mantienen individualizado el clima local de los cañones del que afecta al resto de la plataforma de La Lora, se encuentran matizadas por la presencia de microclimas locales en función de factores muy localizados. Desde este punto de vista, la orientación solana-umbría introduce variaciones tanto en temperatura como en la humedad relativa; por otro lado, al tratarse de valles con vertientes muy pendientes, el ascenso altitudinal provoca un constante rápido descenso de las temperaturas. Situaciones más concretas como la presencia-ausencia de vegetación, la existencia de fuentes o puntos emisores de agua, etc; pueden provocar variaciones que, sin ser muy acusadas, tienen importancia en la actividad o no de los procesos morfogenéticos actuales...*”.

Para finalizar este apartado se muestran gráficos correspondientes a temperaturas y precipitaciones registradas en Sargentos de la Lora para el año 1980. No se encontraron registros históricos puntuales más recientes.

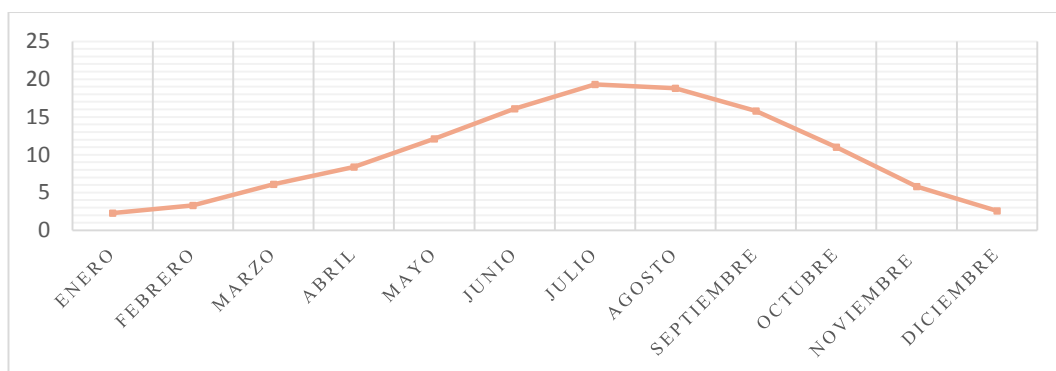


Figura 61: gráfico correspondiente a las temperaturas registradas en Sargentos de la Lora para el año 1980. Unidades: °C.

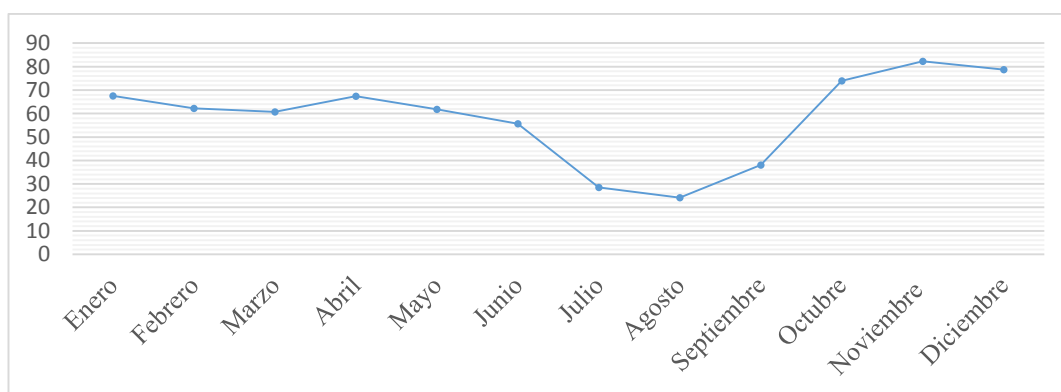


Figura 62: gráfico correspondiente a las precipitaciones registradas en Sargentos de la Lora para el año 1980. Unidades: milímetros.

De la figura 61 se puede inferir que la paramera de la Lora registra aproximadamente temperaturas mínimas de 2 °C y temperaturas máximas de 19 °C. La curva descrita por los valores registrados es bastante simétrica; esto sugiere una tendencia térmica progresiva desde

enero hasta julio; en julio se registra el máximo absoluto y desde el mismo inicia el descenso hasta diciembre. En abril y octubre la curva presenta sendos puntos de inflexión.

De la figura 62 se deduce que los registros de precipitaciones máximo y mínimo son, *grosso modo*, 24 y 79 mm. Estos valores corresponden con los meses de agosto y diciembre respectivamente. La curva es totalmente asimétrica, pero evidencia precipitaciones mínimas que se traducen en periodos de sequedad para la época estival.

Clasificación climatológica atendiendo al atlas climático ibero. Se incluye en esta parte la cartografía aportada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Dicha cartografía está basada en datos registrados por distintas estaciones climatológicas distribuidas a lo largo de la Península Ibérica. La información es registrada y adecuada a los estándares propuestos por la Organización Meteorológica Mundial. El parámetro estadístico es la media aritmética y el periodo de observación inicia en 1971, y termina en el año 2000. Los elementos climáticos que se van a utilizar en la caracterización climatológica regional son la temperatura del aire y la precipitación. El modelo climatológico que se va a utilizar es la última versión propuesta por Köppen en 1936; esta clasificación define distintos tipos de clima a partir de los valores promediados de las variables temperatura y precipitación. Para delimitar los distintos climas se establecen intervalos de temperatura y precipitación basados principalmente en su influencia sobre la distribución de la vegetación y de la actividad humana (AEMET, 2000).

Los métodos de interpolación de datos utilizados dependen de la variable. Para las temperaturas se usó un modelo de regresión multivariada que contempla altitud, distancia al litoral y latitud. En el ajuste de esta función se definieron pesos en función de *la inversa de la distancia al litoral*. En otras situaciones donde la componente geográfica se puede despreciar, se aplicó el método de *kriging* simple (modelo de variograma). Para la cartografía se utilizó la proyección *Lambert Azimuthal Equal Area*; dicha proyección lleva asociados los siguientes parámetros:

- Falso Este = 4.321.000 m.
- Falso Norte = 3.210.000 m.
- Punto Central = 10° E y 52° N.
- Elipsoide = WGS84.

Para la obtención de altitudes se utilizó el modelo digital del terreno calculado por la NASA; dicho modelo cuenta con una resolución aproximada de 90 metros. En la siguiente imagen se muestra la cartografía y clasificación según el modelo Köppen-Geiger.



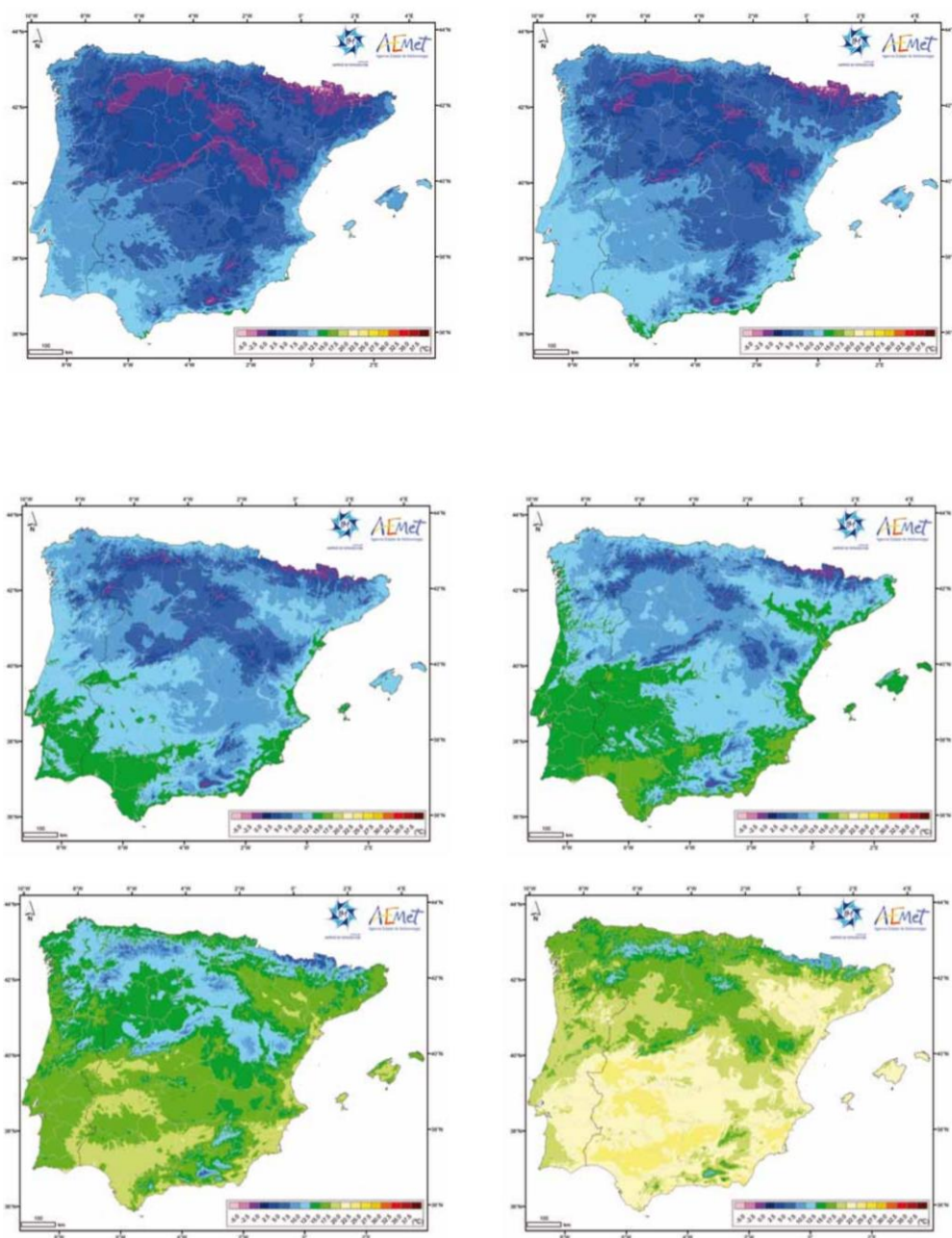
Según esta clasificación la zona de interés se puede clasificar dentro de la categoría C; esta categoría corresponde a un estado templado-mesotermal. El subíndice f designa un registro de precipitaciones constante a lo largo del año. El subíndice s indica un verano seco por lo que el mínimo de precipitaciones coincide con el periodo de temperaturas más altas.

**BURGOS / VILLAFRÍA, 1971-2000**

	J	F	M	A	MY	JN	JL	AG	S	O	N	D
TA	6,7	8,9	12,0	13,3	17,2	22,0	26,4	26,7	22,9	16,5	10,7	7,6
TI	-1,2	-0,6	0,6	2,3	5,6	8,4	11,0	11,1	8,5	5,3	1,6	0,3
TMA	17,0	21,2	24,3	26,0	30,0	34,0	37,8	38,0	36,8	28,6	24,0	20,0
TMI	-22,0	-13,6	-10,4	-6,2	-3,8	0,0	0,1	0,8	-1,4	-3,0	-9,4	-11,8

La figura 64 se ajusta, en cuanto a forma, a la figura 61. Los valores máximos absolutos muestran un incremento de 20° C, magnitud nada despreciable; no obstante, la situación de la estación climatológica de Villafría se encuentra a menor latitud que Sargentos de la Lora; esto se podría traducir en ese aumento de temperaturas tan significativo. Lo mismo sucede con los valores mínimos absolutos. La curva que mejor se ajusta a la registrada en Sargentos corresponde a la temperatura media de las mínimas; sin embargo, en el periodo estival los valores se encuentran 10° C por debajo de la gráfica calculada para Sargentos de la Lora.

En las siguientes imágenes se puede ver la cartografía mensual del registro de temperaturas medias para la península.



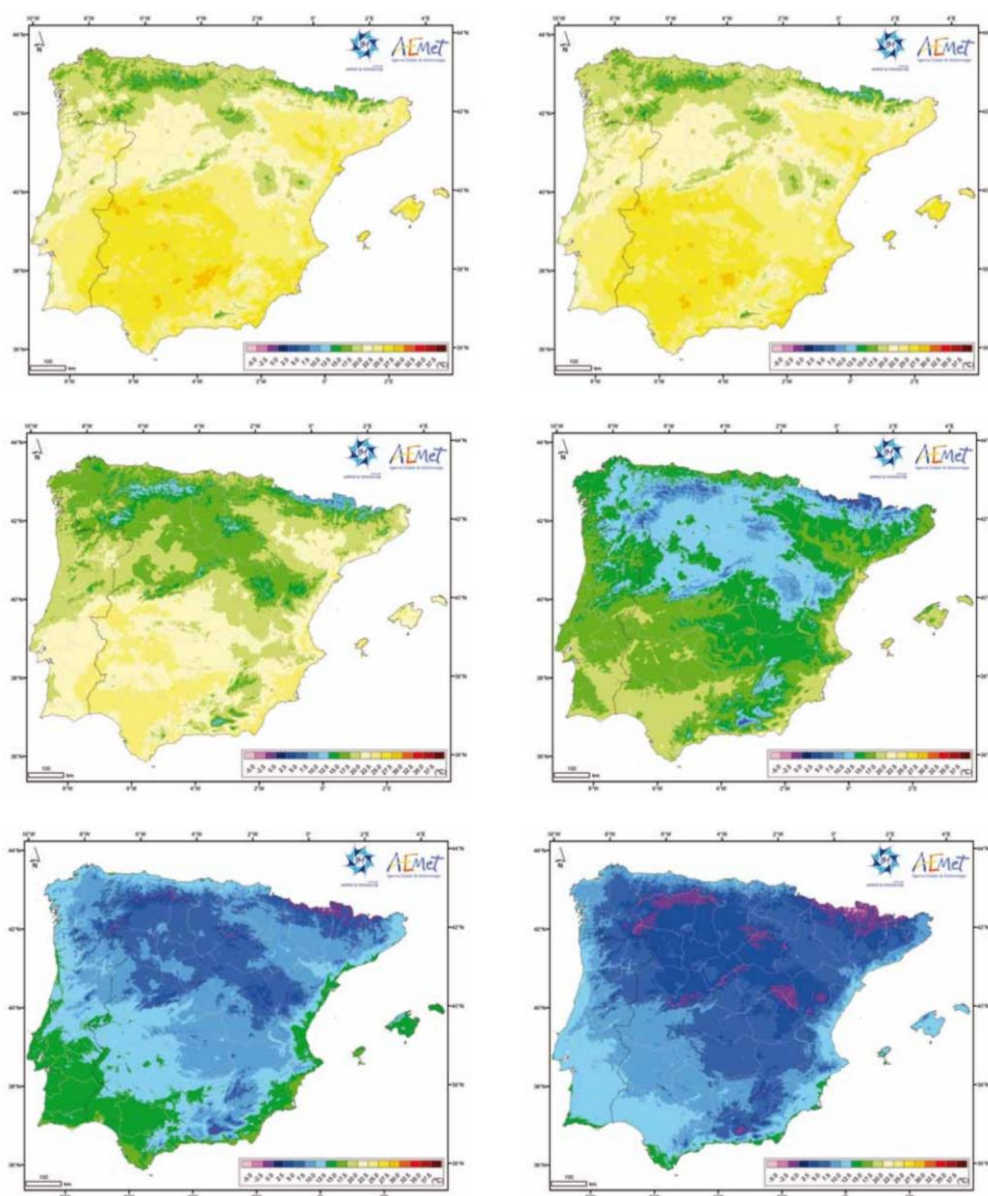


Figura 65: serie cartográfica basada en el registro puntual de temperatura del aire por estaciones climatológicas. Cartografía ordenada según los meses del año empezando en Enero, primer mapa izquierdo, y finalizando en diciembre correspondiente al último mapa derecho. Fuente: AEMET.

A continuación se comentan conclusiones extraída del análisis de la serie anual cartográfica. En primer lugar los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo muestran una situación gráfica homogénea (se mantiene la escala de tonos fríos) para la zona 1; dicha situación se corresponde con temperaturas medias de  $0^{\circ}\text{C}$  hasta  $12.5^{\circ}\text{C}$ . La evolución térmica se produce en progresión ascendente en función de la escala temporal (meses). El mes de junio no es tan homogéneo como los meses anteriores; presenta ambigüedad térmica (contraste entre tonos fríos y cálidos). A continuación se vuelve a registrar homogeneidad gráfica para los meses de julio y agosto; dichos valores corresponden con los valores medios de temperatura máxima considerando el año. Estos valores se encuentran entre  $15$  y  $20^{\circ}\text{C}$ . Finalmente se produce el descenso térmico en la misma medida en la que se produjo el ascenso, pero, en este caso la progresión es negativa

o descendente. Resulta muy interesante verificar y contrastar este análisis con el anterior (realizado de la figura 61). Se puede ver que los rangos de valores son muy parecidos, tanto en magnitud como en evolución temporal.

El siguiente análisis se realiza sobre el registro de precipitaciones. En la siguiente gráfica se muestran los datos recopilados por la estación de Villafra (Burgos).

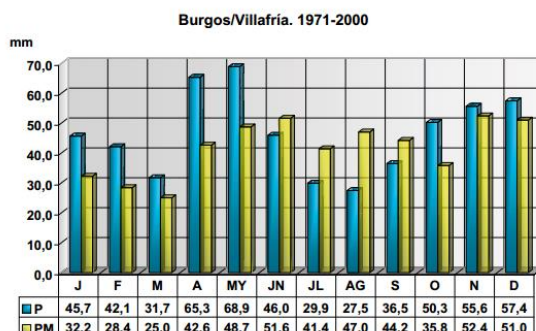


Figura 66: gráfica descriptiva del registro de precipitaciones en Villafra. P: precipitación total media. PM: precipitación máxima diaria. Fuente: AEMET.

Los valores de registro máximo se encuentran en torno a los 70mm, mientras que los valores mínimos toman valores aproximados de 27mm. Destaca un registro elevado para los meses de abril y mayo, así como un registro bajo en los meses de julio y agosto. Comparando estos valores con la gráfica obtenida anteriormente (figura 62), resulta una diferencia poco significativa. Resaltan los meses de noviembre y diciembre, en los que se registraron valores superiores en Sargentos de la Lora. En los primeros meses (enero, febrero y marzo) se registran valores superiores en 15mm, en los datos registrados para Sargentos. Los mínimos registrados para los meses de julio y agosto coinciden sensiblemente para ambas gráficas.

Para finalizar este apartado se procede con el análisis anual de valores de precipitación registrados por la red de estaciones climatológicas. No se incluye la cartografía como en el caso anterior pero la misma se puede encontrar en las páginas 68 y 69 del Atlas climático de España y Portugal de los años 1974-2000, publicado por AEMET. Los meses de enero, febrero y marzo registraron valores acotados dentro del rango de 60mm a 100mm. En marzo se registran valores medios de 50mm. A partir de esta fecha vuelven a incrementarse los valores registrados; se registraron valores de 70-100mm para los meses de abril y mayo respectivamente. Los correspondientes meses registran los periodos más bajos de precipitaciones; los valores registrados son 70, 50, 30, 70mm para los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Finalmente, los meses restantes para completar el análisis anual muestran un aumento; los valores de dicho crecimiento son 70-80-100.

Como conclusión se puede ver que la serie cartográfica elaborada por el Atlas Climático de España y Portugal proporciona datos bastante ajustados a los registrados puntualmente en

Sargentos de la Lora (probablemente hasta incorpore los mismos). La densidad de las estaciones de control es alta y cada día se integran datos, tanto de estaciones oficiales, como de particulares. Se puede citar que las medidas estadísticas, o mejor, los parámetros estadísticos, son más robustos cuanto más representativa es la muestra de la población.

### **3.2.4 Suelos y vegetación**

El suelo es el resultado de la dinámica terrestre sobre la Tierra. Dicha formación comprende la meteorización de roca madre, transporte, sedimentación y compactación (si procede), además del aporte de materia mineral y orgánica, entre otros; la meteorización puede ser de tipo físico-mecánico o químico. Gracias a los suelos, se ha desarrollado la agricultura; herramienta y ciencia de la que los seres humanos no pueden prescindir. Desde el punto de vista del objetivo del presente Trabajo Fin de Grado, los suelos y la vegetación tienen un rol fundamental; sólo a través del estudio del suelo y de la vegetación se puede caracterizar la medida en la que está influida, la región de interés, por filtraciones de hidrocarburos. Este apartado pretende relacionar los apartados anteriores, correspondiendo con conceptos y conclusiones obtenidas en ellos. El contenido de esta sección está restringido a la información que se considere necesaria para las siguientes secciones, además de las propias limitaciones de la Teledetección.

En este apartado se pretende clasificar el suelo en función de la respuesta espectral que puede tener sobre las imágenes que se van a utilizar. Esto incluye distinguir el tipo de escenario antrópico frente al natural. Se considera escenario antrópico aquel en el que el terreno ha sido transformado en un medio que satisface alguna necesidad humana; en esta clasificación no se considera como escenario antrópico, ni la tala de árboles masiva, ni incendios provocados, ni ninguna actividad que altere el medio físico; dichos fenómenos generan cambios en los sistemas terrestres, pero, el objetivo de este trabajo no es cuantificarlo. Se considera como medio que satisface alguna necesidad humana los siguientes: usos del suelo con finalidad agrícola, usos del suelo para construcción y edificación, construcción de carreteras e infraestructura de comunicación, etc. Se recuerda que la resolución espacial que se está empleando se encuentra en 15-30m luego se omite la valoración de detalles que pasan inadvertidos para los sistemas de captura utilizados.

La manifestación antrópica sobre la escena de interés no se distingue con claridad. Al ser la mínima unidad de resolución en terreno 15 m la mayoría de fenómenos, por no decir todos, no se diferencian. No obstante, mediante la ayuda de cartografía (por ejemplo el MTN), se identifican para justificar alguna posible anomalía en las secciones que se desarrollen a continuación.

Uno de los factores principales en la clasificación de un suelo es su génesis. Se distinguen factores activos y factores pasivos; se consideran factores activos la vegetación y la dinámica atmosférica, que, como se vió en el apartado de climatología, junto con la geografía del lugar determinan el clima. Por otro lado, se consideran factores pasivos la geología y geomorfología



del lugar, la exposición, el régimen hídrico, etc. En función de estos factores se procede a la clasificación de los distintos suelos que componen la escena de interés.

1. Clasificación atendiendo a profundidad y tipo de perfil. La Organización de las Naciones Unidas de Alimentación y Agricultura propone una clasificación que se puede considerar apta para este caso. En la siguiente imagen se muestra la clasificación de la península.

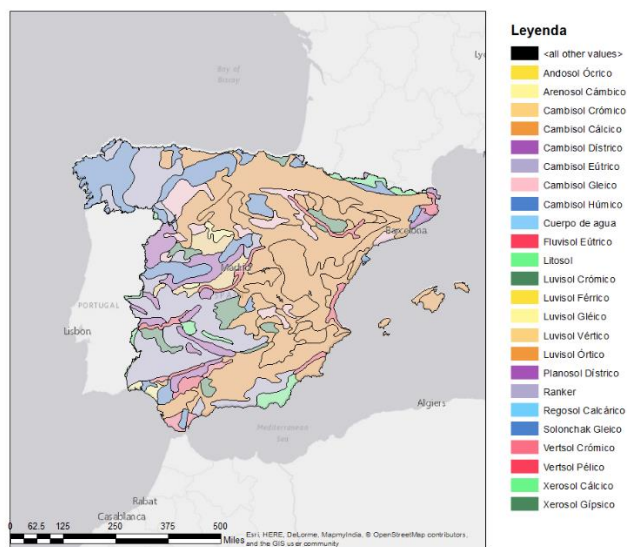
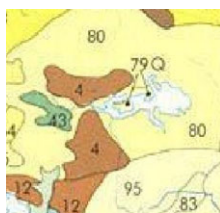


Figura 67: clasificación en función del tipo de suelo, tomando como referencia la categorización propuesta por la Organización de las Naciones Unidas de Alimentación y Agricultura. Fuente datos: Francisco Javier López Acevedo. Edición cartográfica: propia en configuración. Leyenda elaborada por UNESCO.

La región de interés, al ser una franja de transición, puede tener los siguientes tipos de suelos (según la clasificación de la UNESCO): a) cambisol cálcico (zona más meridional) y b) cambisol húmico (zona más septentrional). Se realizaron sendas consultas que pormenorizan la clasificación; de las mismas para el suelo a) se añade: suelos con un horizonte cámbico desaturado debajo, generalmente, de un horizonte úmbrico o de uno óctico, como característica principal. A su vez para b) se asignaron las mismas características. Los suelos tipo cambisol se caracterizan por una meteorización de material parental (roca madre) y por ausencia de cantidades apreciables de arcilla iluvial, materia orgánica, compuestos de Al y/o Fe (FAO, 2007). Son medianamente evolucionados y cuentan con un perfil A-(B)-C. Un horizonte (el B) corresponde a un tipo de suelo cámbico; dicho suelo se considera un suelo de cambios favorecidos por la meteorización de la roca madre (en este caso (a) presenta una sub-denominación como suelo cálcico Bk; lo cual se traduce en una acumulación de carbonato cálcico en el horizonte B). En el caso (b) se trata de un horizonte Bh,

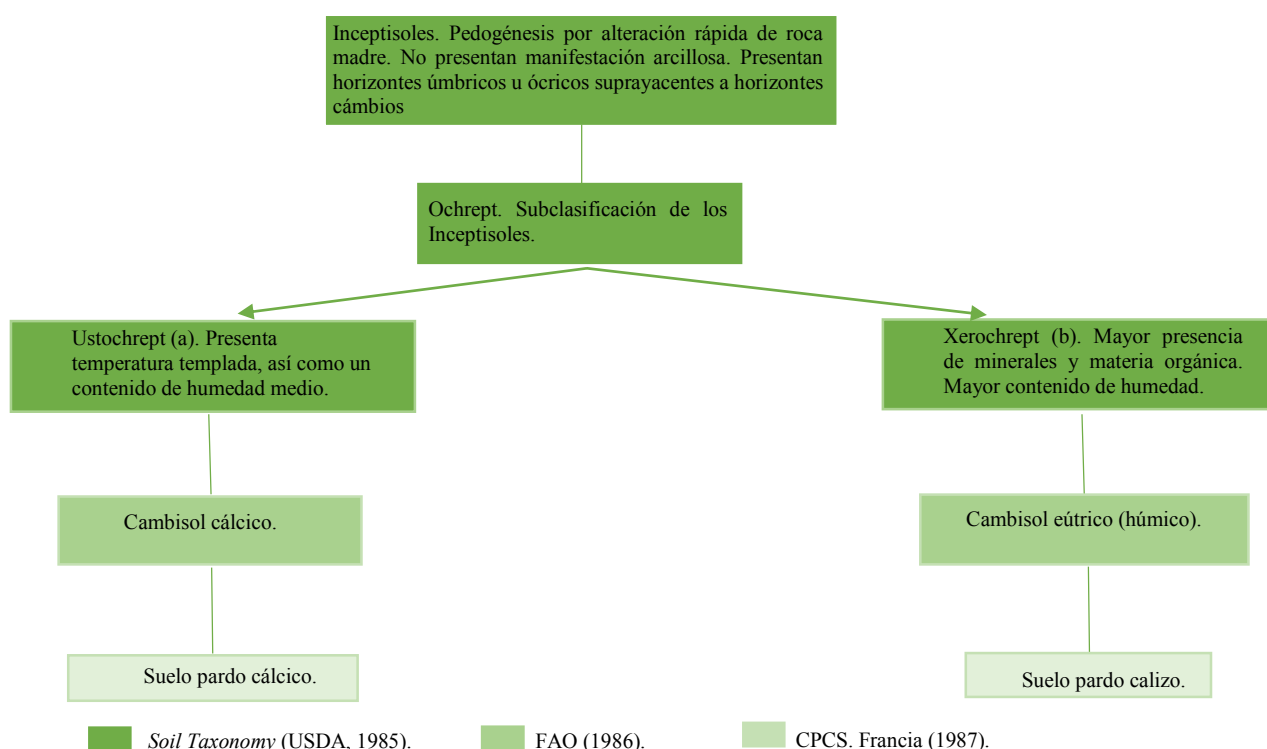
luego se trata de una acumulación de humus en el horizonte B). El cambisol de tipo cálcico presenta una capa de espesor mayor a 15cm, enriquecida de carbonatos en una proporción mayor al 15%, por lo menos, en los primeros 125cm. Por otro lado, el cambisol húmico presenta mayores porcentajes de materia orgánica; dicha componente se aprecia en la forma en la que se transforma el horizonte que en este caso no es por meteorización química del carbonato cálcico. Finalmente se distingue para (a) un horizonte A de tipo ócrico que corresponde con suelos de tonos claros, contenido de materia orgánica >1%, puede tener una profundidad desde 18 hasta 75cm (dependiendo del material infrayacente) y se encuentra saturado en bases >50%. Para (b) el horizonte A es de tipo úmbrico; presenta las mismas características que el ócrico, pero el color es más oscuro. Normalmente el horizonte A para la los suelos (a) suele ser de menor profundidad que para los suelos (b); esto puede explicar que sobre los suelos (b) se desarrollen formas de vegetación más altas y frondosas.

2. Clasificación según el Atlas Nacional de España, sección II (El Medio Terrestre), Edafología. En la siguiente imagen se puede ver un detalle de la referencia citada previamente.



*Figura 68: detalle cartografía edafológica Atlas Nacional de España. Fuente: IGN.*

La clasificación del suelo presente en la sub-escena responde a los números 80, 79Q, 4 y 95. En el siguiente mapa conceptual se diferencia las clases 80 (a) y 95 (b); las cuales son las más representativas de la región de interés.



Atendiendo a este criterio se buscó información sobre ese tipo de suelo y se encontró una clasificación propuesta por José María Albareda del Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología. Se distinguen suelos calizos sobre materiales consolidados y no consolidados. Las características fundamentales de los suelos calizos sobre materiales no consolidados son:

- Geomorfología y material originario. Suelos con carbonato cálcico libre en el perfil y desarrollados sobre sedimentos calizos (generalmente terciarios). Alternancia con otros materiales como areniscas, calizas o conglomerados.
- Perfil y propiedades generales. Perfil tipo A (B) C. Horizonte A constituido por humus en forma de mull cálcico xerofítico con tonalidades pardo o pardo oscuro. La estructura granular se encuentra muy desarrollada y la consistencia es de tipo medio. El horizonte B depende de marga/caliza originaria; en dicho horizonte pueden aparecer fragmentos de areniscas o calizas de diversos tamaños, presentándose como consecuencia de los arrastres de ladera. Pueden existir zonas donde se evidencien manchas de suelos salinos.



- Propiedades químicas y minerales. El pH varía entre 7 y 8 (alcalino o básico). La capacidad de cambio de bases es baja a meda, siendo el calcio el elemento más abundante en el cambio, el cual está muy saturado. El bajo porcentaje de arcillas presente en este suelo está compuesto por illita y caolinita (predominio de illita). En la arena, fracción ligera, el cuarzo oscila entre el 80 y 85% y en la fracción pesada la turmalina y el zircón son dominantes.
- Aprovechamiento. Zonas accidentadas presentan suelos formados en estratigrafía alternante de margas con areniscas, calizas o conglomerados. Su aprovechamiento es eminentemente forestal. Zonas más suaves, por ejemplo el valle del Ebro, se puede cultivar cereales. En régimen de regadío también se pueden obtener buenos rendimientos.

A continuación se desarrollan algunas diferencias del suelo calizo pardo sobre material no consolidado (NC) y suelo calizo pardo sobre material consolidado (C).

- El horizonte B en C tiene poca estabilidad y consistencia, alta porosidad, buena aireación y penetrabilidad para el agua y las raíces de las plantas. Los tonos pueden ser pardos o pardos rojizos en función del estado de evolución y erosión del suelo.
  - La evolución en C refleja lavado y acumulación de caliza hacia los horizontes más inferiores. Esta pequeña formación y dinámica de los óxidos de hierro existe condicionada al contenido y cantidad de carbonato cálcico; por consiguiente, los estados menos evolucionados se corresponden con tonos claros, así como los más evolucionados corresponden a tonos más rojizos (en los cuales se aprecia un aumento significativo del lavado de calizas, lo cual, genera una neutralización del pH y en consecuencia comienza la liberación de óxidos de hierro y aluminio.
  - En el aprovechamiento de C, es frecuente que la profundidad de los mantos freáticos permita el aprovechamiento de la esorrentía subterránea, dando origen a regadíos de importancia local.
3. Clasificación agrológica. Esta clasificación se asigna en función de las competencias agrícolas que tenga el suelo. En la siguiente imagen se muestra la clasificación para la provincia de Burgos.

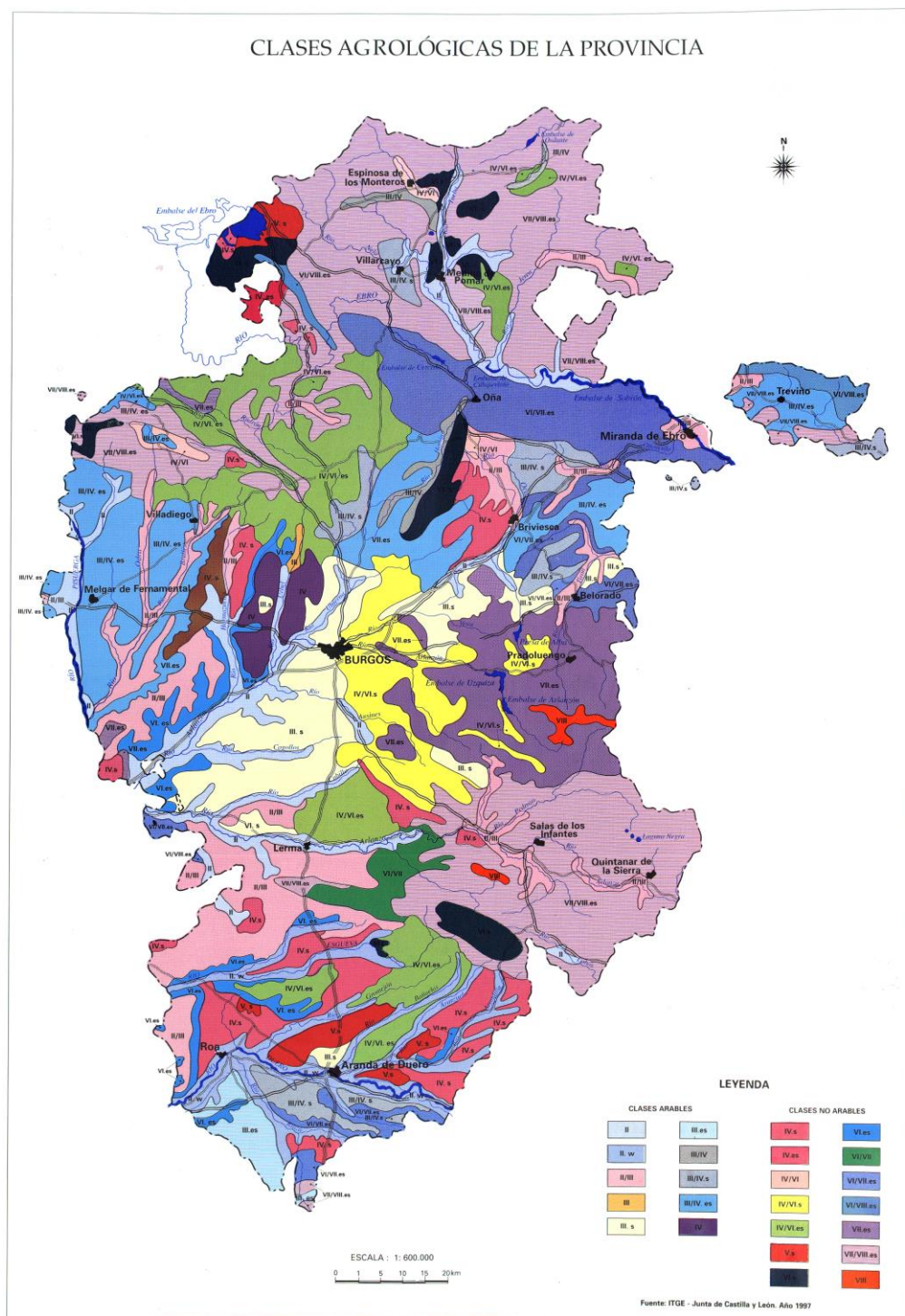


Figura 69: clasificación de los suelos atendiendo a las competencias agrícolas. Fuente: ITGE.

En dicha clasificación se puede ver como en la región de interés se encuentran suelos IV, V y VI. Las características de cada clasificación son:

- IV. Suelos apropiados para cultivos ocasionales o muy limitados con métodos intensivos. Presentan los siguientes rasgos: pendientes pronunciadas, susceptibilidad severa a la erosión por agua o viento, acción erosiva pasada, suelos superficiales de poco espesor, baja capacidad de retención de agua, frecuentes inundaciones, humedad excesiva y moderados efectos adversos del climas.
  - V. Suelos no apropiados para el cultivo, pero adecuados para vegetación permanente, como praderas y masas arbóreas. Algunas características de este tipo de suelos pueden ser: hidromorfia permanente, inundaciones frecuentes, elevada pedregosidad y severos condicionantes climáticos.
  - VI. Estos suelos son adecuados para soportar una vegetación permanente, pudiéndose dedicar a pastos o bosques con restricciones moderadas. Este tipo de suelo presenta: pendientes muy pronunciadas, son suelos susceptibles de erosión severa, la erosión pasada ejerce influencia significativa, baja capacidad de retención de agua, elevada salinidad o alcalinidad y factores climáticos severos.
4. Clasificación en función de las pendientes. Previo a la elaboración de un mapa de pendientes se tiene que elaborar un mapa de altitudes. Se cargaron los modelos digitales del terreno (MDT) de las hojas 134 y 135 correspondientes al MTN 1:50.000. A partir de estos MDT se obtuvieron curvados y posteriormente se generó un modelo TIN. La clasificación por alturas va a facilitar el análisis de la vegetación, por esa razón se ha decidido su inclusión. Los resultados de la clasificación por alturas se pueden ver en la siguiente imagen:

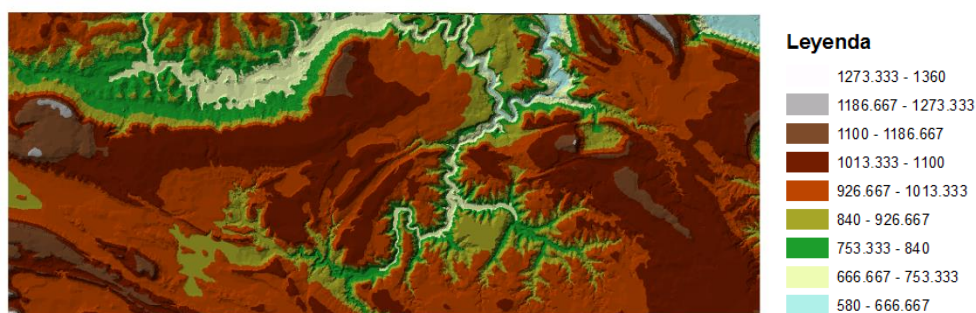


Figura 70: clasificación del MDT del MTN hojas 134 y 135, según altitudes.

La altura mínima se registra en las proximidades de la red hídrica. Su valor mínimo se encuentra entre 580 y 667m como se puede ver en la leyenda. Los valores máximos se encuentran entre 1187 y 1273m.

A partir de este mapa base se puede generar un mapa de pendientes, el cual se puede ver en la siguiente imagen (figura 99). Esta cartografía también ayuda de forma gráfica a evaluar el tipo de vegetación o cultivo que se puede desarrollar sobre el suelo. Se puede ver como el valle del Ebro tiene una pendiente muy suave (2-5°); también se puede ver que el cañón del Ebro y Rudrón tiene pendientes próximas a los 40°; estas son las máximas que se han registrado para la zona de estudio. Este mapa también pone de manifiesto lo desabrigado que se encuentra el páramo en comparación con el interior del cañón del Ebro.

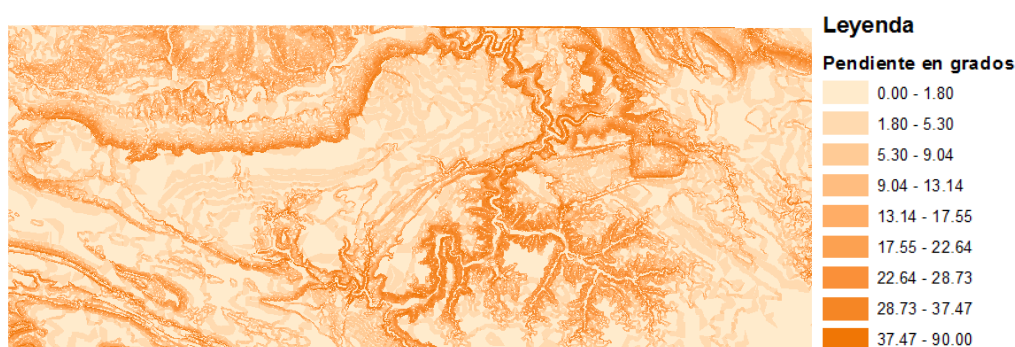


Figura 71: clasificación del MDT del MTN 1:50000, hojas 134 y 135, según los grados de la pendiente.

La vegetación es de vital importancia para el desarrollo de los diferentes ecosistemas que se dan en la Tierra. La vegetación, o manto vegetal de un territorio dado, evidencia el tipo de suelo, clima, contaminación, entre otros factores; también es productor primario en la biosfera. Como se ha podido observar en secciones anteriores, su uso resulta indispensable para la clasificación de una imagen adquirida por sensores remotos (figura 72); por otro lado, existen anomalías botánicas que se dan debido a la presencia de una reserva de hidrocarburos con filtraciones que fluyen a través de mecanismos de filtración. En este apartado se pretende hacer una descripción general del manto vegetal del territorio de interés; dicha descripción se realiza de forma general y de forma particular. Como descripción general se describe la vegetación como conjunto resultante de la disposición en el espacio de diferentes tipos de vegetales presentes en una porción cualquiera del territorio geográfico (Aguilo Alonso, 2007). Como descripción particular se describe la vegetación como flora; conjunto de especies y variedades de plantas de un territorio dado.

A continuación se procede con la clasificación general. Esta clasificación es más importante que el estudio floral para el objetivo del actual proyecto; es muy difícil, con la resolución espacial que tienen los sensores, discernir entre flora específica, tanto en taxonomía como en densidad (suelen encontrarse de forma puntual); por dicho motivo resultan más interesantes los rasgos presentados por vegetación que abarque grandes extensiones territoriales.

La combinación de los efectos de la aridez estival y de los fríos característicos condiciona, en el ámbito de las llanuras, la presencia de un bosque de tipo esclerófilo y de hoja perenne, en el que la encina (*Quercus ilex*), que aparece casi siempre en forma de carrasca, es el máximo representante. En los fondos de los valles, junto a los cursos de agua y en los lugares más frescos, aparece una vegetación de ribera, que forma sotos, con chopos (*Populus nigra*), álamos (*Populus alba*), sauce (*Salix alba*, *S. fragilis*, *S. neotricha*) (Historia de Burgos, 1993).

Otra clasificación general ha sido realizada por la influencia de la Cordillera Cantábrica. Dicha clasificación establece esta clasificación en función de la altitud (Bosque Candel, 2005):

- Altitud > 1200 m: Prados y matorrales.
- Altitud dentro de 1000-1200 m: Prados y Haya.
- Altitud dentro de 800-1000 m: Roble y Roble melojo.
- Altitud <800 m: Encina y Pino carrasco.

Clasificación general atendiendo al componente litológico (González Pellejero, 1984):

1. Cumbres:

- Turoniense calizo (zona limítrofe) – Matorral denso de encina.
- Turoniense calizo (resto) - Matorral claro de encina.
- Santoniense calizo - Matorral de quejigo muy abierto.
- Santoniense margoso - Cultivos abandonados.

2. Cantiles:

- Turoniense calizo - Ejemplares aislados de encinas; haya dispersa.
- Santoniense calizo – ídem anterior.

3. Taludes:

- Coluviones espesos – Formaciones arborescentes densas (50-70%).
- Pedreras - Encinas y enebros.
- Vertientes regularizadas – Desnudas.

4. Pendientes basales taludes:

- Áreas de cultivo, abandonado o no.

5. Llanura aluvial:

- Áreas de cultivo, abandonado o no.

6. Riberas de los cursos de agua:

- Sotobosque.

Se verificó la clasificación mediante un itinerario fotográfico a través de Google Earth del cual se extrajeron las siguientes muestras fotográficas:





Figura 72: clasificación general vegetación autóctona región de interés. De primera fotografía (izquierda) a última: *Quercus ilex* (ejemplar encina no perteneciente a la zona 1), chopos bajo Peña Camesía (Ebro), cereales (Polientes), Cerro de Sargentos, Bustidoño (Cantabria), Quintanilla de Santa Gadea (vista aérea), Arroyo Campo de Yuso (Cantabria). Fuente: Google Earth.

Una clasificación pormenorizada se encuentra en el atlas de la flora vascular silvestre de Burgos (Saénz, López y otros, 2006). También se encontró un artículo que incluye el estudio sobre la flora briológica española, particularizada para el caso de la paramera de la Lora (Casas, Fuertes y otros, 1992). En esta clasificación se comentan algunos de los aspectos más interesantes sobre la vegetación que crece en la mencionada paramera. La clasificación a un nivel de detalle menor a la resolución espacial del sensor no tiene mucho sentido; por esta razón, se incluyen las categorías más frondosas.

La siguiente imagen muestra una categorización general, de carácter puntual, realizada sobre la región de interés del presente Trabajo Fin de Grado. Dicha categorización corresponde con considerable precisión con las clasificaciones anteriores. Es interesante como las situaciones de altitud, situación geográfica, exposición al sol y al viento generan, cuando las mismas se dan en la misma medida, grupos de vegetación tan similares. Para revisar la taxonomía realizada por este equipo de investigación, se remite al artículo antes mencionado.

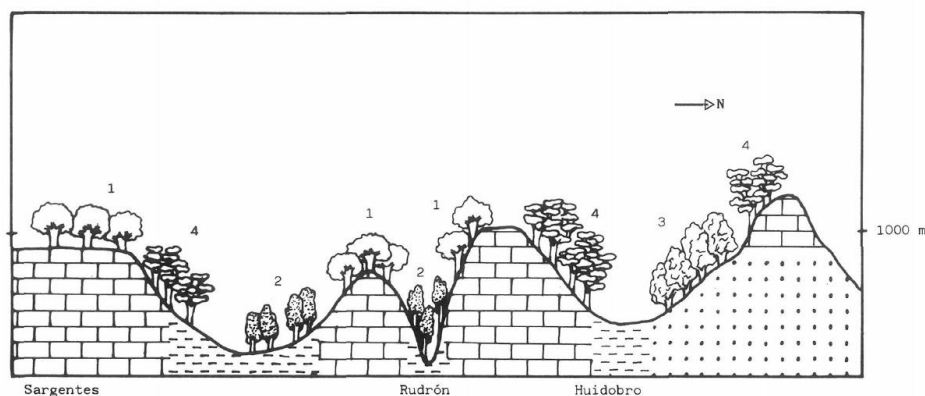


Figura 73: clasificación vegetación región de interés. 1, encinares de *Spircieo-Quercetum rotundifoliae*; 2, quejigares de *Spiraeo-Quercetum fagineae*; 3, melojares de *Festuco-Quercetum pyrenaicae*; 4, hayedos de *Epipactido-Fagetum*. Fuente: Casas, Fuertes y otros, 1992.

### 3.2.5 Hidrogeología

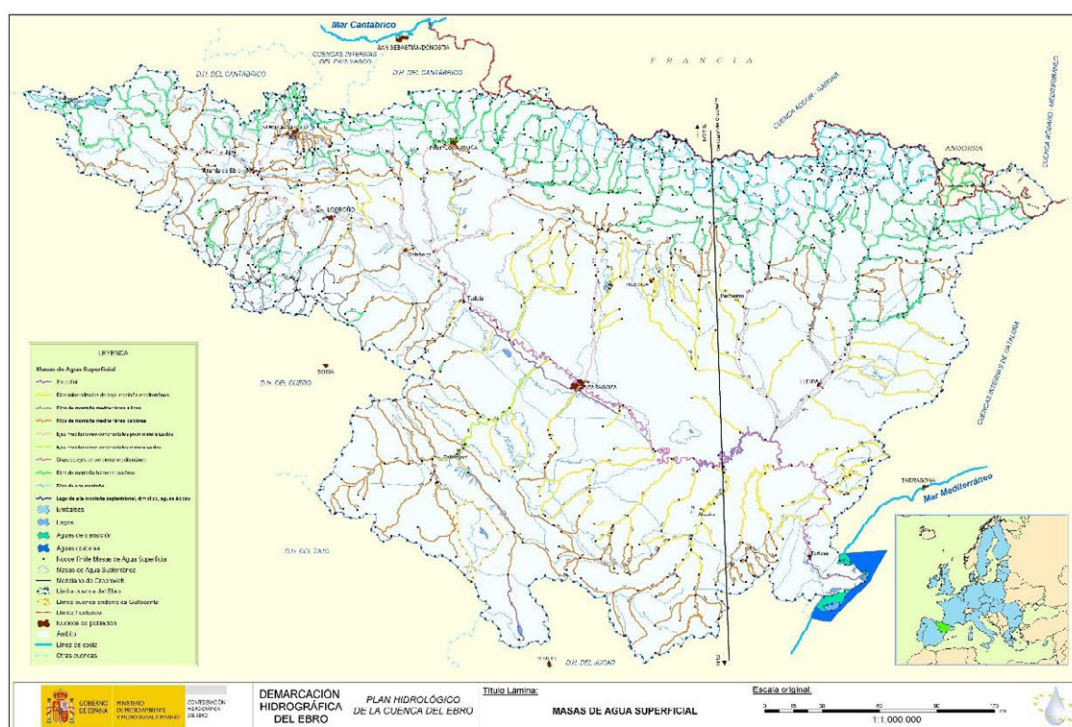
La influencia de la hidrogeología en la zona 1 es significativa. En rasgos generales se cuenta con el embalse del Ebro y su río homónimo; no obstante, se encuentran más formas que se desarrollarán a continuación. La mencionada zona se puede enmarcar dentro de los límites de la cuenca del Ebro, concretamente en la zona alta del mismo. El estudio que aquí se desarrolla abarca un análisis general que incluye el contexto de la cuenca del Ebro y un estudio específico de la cuenca de la zona 1. Para desarrollar ambas partes se cuenta con: a) Para el caso de la cuenca del Ebro se tiene toda la información facilitada por la Confederación Hidrológica del Ebro; b) Estudio específico de la hidrogeología mediante el análisis morfométrico de modelos digitales del terreno (MDT). Para este propósito se utilizarán los MDT con paso de malla de 5 m de las hojas del MTN 1:50.000, 134 y 135; también se utilizará el MDT con paso de 200 m, correspondiente al mapa provincial 1:200.000 de Burgos.

En esta parte se realiza un estudio general de la cuenca del Ebro. En primer lugar se va a distinguir la cuenca de interés dentro de las existentes en la península. En la siguiente ilustración se puede ver su situación (figura 74). La cuenca del Ebro tiene parte en la zona meridional de la península, sin llegar al litoral cantábrico (por imposición de la Cordillera Cantábrica), y va aumentando progresivamente en área hasta desembocar en la zona norte del mediterráneo. La cuenca está marcada por el cauce principal que asigna el nombre propio a la cuenca. En la imagen se puede ver que la cuenca del Ebro tiene como cuencas colindantes la cuenca Cantábrica, además de las correspondientes a los cauces principales: Duero, Tajo y Júcar.



*Figura 74: en rojo cuenca del Ebro, en azul otras cuencas. Fuente: Confederación Hidrológica del Ebro.*

La zona 1 se encuentra en la cuenca alta del Ebro; muy próxima al nacimiento del cauce principal (Pico Tresmares). Los siguientes mapas que se muestran, corresponden a las masas de agua tanto superficiales como subterráneas.



*Figura 75: cartografía descriptiva de la distribución de aguas superficiales a lo largo de la cuenca del Ebro.*  
Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro.



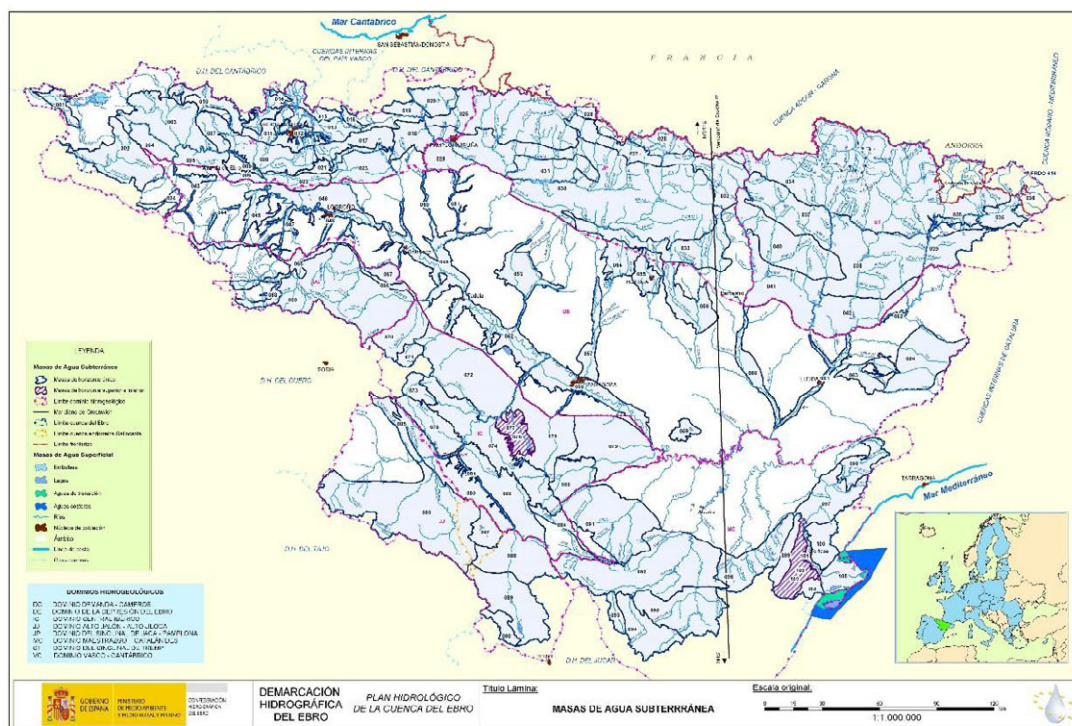


Figura 76: cartografía descriptiva de la distribución de aguas subterráneas a lo largo de la cuenca del Ebro. Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro.

La zona de interés se ha clasificado, en cuanto a escorrentía superficial, como *ríos de montaña húmeda calcárea*. Esta clasificación se corresponde con la evaluación geológica y geomorfológica. Destaca también la copiosa presencia de ríos y afluentes clasificados como *ríos mineralizados de baja montaña mediterránea* (color amarillo) y ríos de montaña mediterránea calcárea (color pardo claro). Respecto a la escorrentía subterránea, la zona de interés ha sido clasificada como masas de agua subterránea de horizonte único. En el margen izquierdo (cuenca alta) predominan los acuíferos carbonatados con importantes desarrollos cársticos por las elevadas precipitaciones que dan lugar a flujos locales y rápidos. En la margen derecha, sistema ibérico o desembocadura, destacan acuíferos carbonatados de gran espesor y comportamiento regional con flujos muy lentos. En la depresión central destacan acuíferos aluviales ligados a los grandes ríos.

Como se vio anteriormente una cuenca hidrográfica es aquella disposición del terreno que permite el flujo de escorrentía, tanto superficial como subterránea, dirigiendo cauces de distinto orden a un punto común o punto de cierre. La clasificación realizada antes no se considera del todo exacta dado que la región de interés comprende una diminuta fracción del área total de la cuenca del Ebro. Por este motivo se decide delimitar la cuenca de la zona 1 y calcular sus parámetros morfométricos para su clasificación pormenorizada. Para lograr este objetivo se va a utilizar el MDT correspondiente al mapa provincial de Burgos 1:200.000 al que se le aplica metodología paso a paso mediante el uso de ARCGIS y metodología automatizada mediante el

uso de IDRIS; ambos corresponden a software especializado en tratamiento de datos espaciales. Se evaluarán los resultados obtenidos tanto por un método como por otro.

1. Procedimiento seguido con ARCGIS. En primer lugar se define el dominio espacial de la cuenca. Para delimitar el área de la cuenca es indispensable contar con una descripción altimétrica de la zona. Mediante el análisis de líneas de ruptura, así como puntos singulares, del terreno se establece el área de la cuenca. Gracias al uso del MDT se puede hacer de forma automática. La cuenca definida es la siguiente.

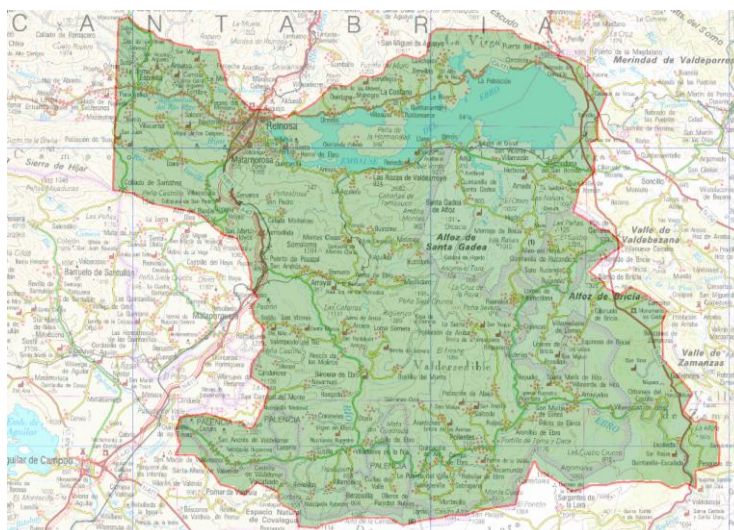


Figura 77: delimitación de cuenca correspondiente a la zona 1. Fuente cartografía: mapa provincial de Burgos 1:200.000.

Una vez se ha definido la cuenca se calculan los siguientes archivos: acumulación y dirección. Una vez obtenidos dichos archivos se utiliza la función *fill* y se exporta el archivo *raster* como *shape*. Se crean sendos campos para el área, perímetro y coordenadas planas para el centroide de la cuenca. Una vez obtenidos los parámetros geométricos de la proyección ortogonal de la cuenca sobre el plano XY, se procede con la valoración y clasificación altimétrica. En la siguiente imagen se muestra la imagen clasificada por distintos intervalos de altura. Se añade también las estadísticas correspondientes al MDT, al que previamente se aplicó un filtro en forma de máscara para obtener sólo los valores de la cuenca de interés. Como se puede ver la cuenca se clasificó en nueve clases equiespaciadas 95 m. Las clases 2 y 3 son las que mayor área abarcan así como la clase 9 es casi inexistente. La altura de aproximadamente 840m es la que tiene mayor frecuencia absoluta y por ende mayor probabilidad o frecuencia relativa.

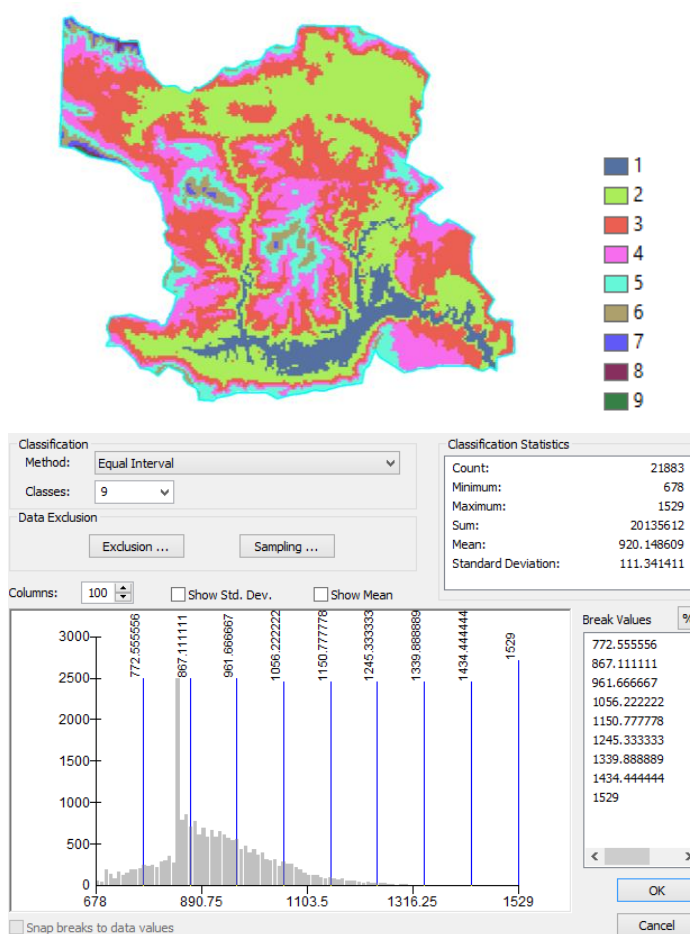
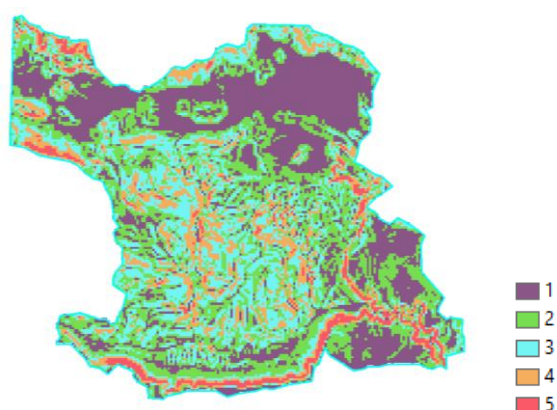


Figura 78: clasificación de cuenca hidrográfica en función de la altitud.

Una vez obtenido el mapa de altitudes, se calcula el mapa de pendientes de la cuenca, no se debe confundir este último con el presentado en el apartado anterior; se tratan de mapas distintos. Este mapa se reclasificó en cuatro clases. En la siguiente figura se puede ver el resultado. Se clasificó el mapa en cinco clases compuestas por los siguientes intervalos:

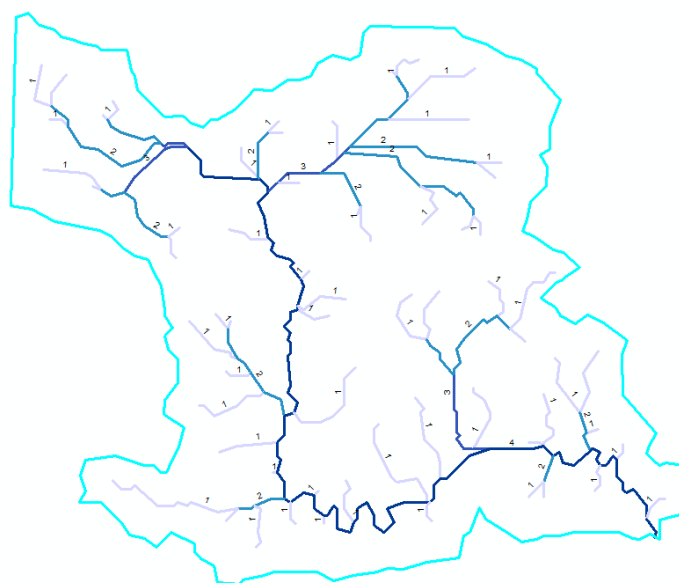
- Clase 1: 0-6° con un promedio de 2.45°.
- Clase 2: 6-12° con un promedio de 9°.
- Clase 3: 12-20° con un promedio de 16°.
- Clase 4: 20-31° con un promedio de 24°.
- Clase 5: 31-59° con un promedio de 38°.

Se puede ver que la zona de máxima pendiente corresponde al borde de la plataforma (o paramera de la Lora), así como al desfiladero del Ebro. Las zonas de menor pendiente se corresponden a la llanura aluvial del río principal, así como a la zona pantanosa del embalse del Ebro.



*Figura 79: clasificación del mapa de pendientes en cinco clases. Dominio espacial acotado en la proyección ortogonal de la cuenca de interés sobre el plano xy.*

El siguiente paso es la clasificación de la red de drenaje. La clasificación corresponde al modelo Strahler (forma numérica que expresa la complejidad de una ramificación). Atendiendo a este criterio se obtuvo la siguiente clasificación:



*Figura 80: clasificación de la red hídrica en función del modelo propuesto por Strahler.*

De la misma se puede inferir el orden de grado cuatro para el río principal así como el predominio del orden de grado 1 para los distintos afluentes de la zona 1. También es importante destacar el error que comete el software al encontrar ramificaciones hídricas dentro del embalse. Para finalizar este apartado se adjunta una tabla que incluye los diferentes parámetros morfométricos de la cuenca. Dichos parámetros fueron calculados por dos programas diferentes. También se muestra la diferencia de la curva hipsométrica y perfil longitudinal obtenido por ambas aplicaciones.

Tabla 13: parámetros morfométricos cuenca zona 1.

Parámetro	Registro_ARC	Registro_IDRI	Unidad	Descripción
<i>CLVRGN</i>	1.00	1.00		Cuenca hidrográfica
<i>A_KM2</i>	876.00	875.00	Km2	Superficie de cuenca
<i>P_KM</i>	165.00	212.00	Km	Perímetro de la cuenca
<i>EM_M</i>	920.00	919.00	msnm	Elevación media
<i>PM_G</i>	6.00	7.20	°	Pendiente media (grados)
<i>PM_P</i>	50.10	11.00	%	Pendiente media (porcentaje)
<i>KC</i>	1.57	2.02		Coefficiente de compacidad (Gravelius)
<i>LC_KM</i>	86.60	87.45	Km	Longitud del eje del río principal
<i>LA_KM</i>	31.00	22.00	Km	Longitud directa del río principal
<i>SH</i>	2.79	4.08		Coefficiente de sinuosidad hidráulico
<i>EMX_M</i>	820.00	857.00	msnm	Altitud inicial
<i>EMN_M</i>	700.00	660.00	msnm	Altitud media
<i>SC_P</i>	2.00	2.73	°	Pendiente promedio del río principal
<i>TC_KIRPIC</i> <i>H</i>	NA	21.57		Tiempo de concentración Kirpich
<i>TC_CHPW</i> <i>H</i>	NA	21.69		Tiempo de concentración de California Highways and Public Works

La mayoría de los parámetros se calculan en función del perímetro. IDRISI genera un perímetro discreto (o escalonado) poco preciso mientras que ARCGIS genera un perímetro continuo. Por esta razón, se otorga mayor fiabilidad a los datos obtenidos por ARCGIS. Destaca la baja pendiente que tiene el cauce principal así como su elevado índice de sinuosidad que indica una clasificación meandriforme (según Rust, 1978). Finalmente se muestra el perfil longitudinal y la curva hipsométrica. En función de estas gráficas se clasifica el cauce principal.

- Curva hipsométrica.

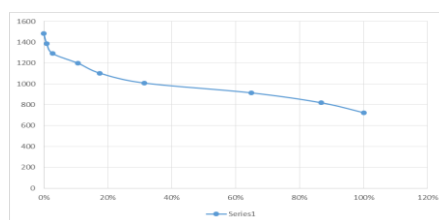


Figura 81: curva hipsométrica.

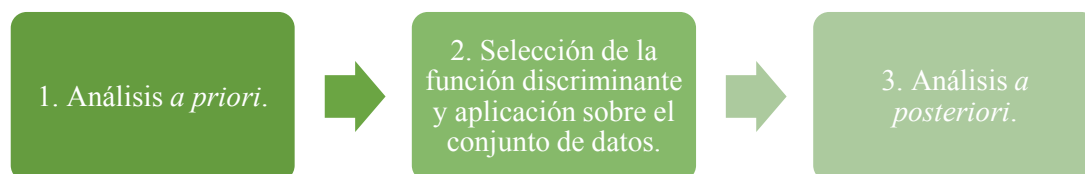
Según estas curvas el cauce principal se puede clasificar como un *río viejo*. Este se caracteriza por una capacidad erosiva suave; por otro lado, la llanura aluvial presentará gran cantidad de depósitos aluvio-coluviales, donde el aporte por dinámica de vertientes es bajo como consecuencia del fenómeno de biostasia.



### 3.3 Clasificaciones

El análisis realizado en el apartado anterior sirve para establecer clases espectrales. Se ha demostrado en diversas publicaciones (Arroyo, 2012) que el índice de precipitaciones, así como otras variables que influyen en el estado del medio físico en el instante de registro de la imagen, perjudica significativamente los resultados obtenidos en determinados procesos de Teledetección. También resulta interesante la presencia de abundante material sedimentario, arrastrado por los procesos de erosión comentados en la sección anterior. Este tipo de material destaca por su alta reflectividad. El estudio edafológico, junto con el geológico, sirvió para establecer diferentes clases espectrales. Finalmente se quiere resaltar la importancia del apartado anterior para dar validez a los procedimientos que se exponen a continuación. Las clasificaciones son necesarias en los procedimientos aplicados en teledetección, puesto que, permiten evaluar la capacidad de discernir distintas cubiertas terrestres y clasificarlas según su naturaleza o uso; para, posteriormente, evaluar si son susceptibles de sufrir variaciones por presencia de hidrocarburos.

Las clasificaciones se dividen en tres pasos; dichos pasos se muestran en el siguiente diagrama de flujo.



Existen diferentes formas de realizar los pasos establecidos en el diagrama de flujo. En el actual Trabajo Fin de Grado se proponen tres modelos. Los modelos I y II siguen las pautas de una clasificación supervisada (al definir áreas de entrenamiento); el modelo III propone un caso particular de clasificación no supervisada.

#### 3.3.1 Modelo de clasificación I

Este modelo se calcula con el software SOV. Como análisis *a priori* se utiliza la obtención del coeficiente kappa óptimo. La función discriminante empleada en este modelo es la función de probabilidad condicionada óptima (también conocido como clasificador de máxima verosimilitud). El análisis *a posteriori* se realiza con una perspectiva múltiple. Se calcula la normalidad de las clases mediante los coeficientes de curtosis y asimetría. Se valora la separabilidad espectral utilizando la distancia bhattacharyya. Finalmente se evalúa la bondad de la clasificación a través de la matriz de contingencia (o confusión). A continuación se pormenoriza en los pasos.

1. Obtención del coeficiente kappa óptimo. Análisis a priori. Previo a la obtención del coeficiente kappa óptimo es imprescindible la definición de áreas de entrenamiento. La teoría sugiere que el número de muestras ha de ser mayor al número de bandas para poder invertir la matriz de varianzas-covarianzas. Para lograr valores significativos se sugiere tomar muestras del orden de  $100 \cdot n$  o  $1000 \cdot n$ ; donde el valor numérico indica el número de píxeles y  $n$  el número de bandas que registra el sensor. La obtención de este coeficiente confronta los valores definidos como “teóricos o entrenados” con los “clasificados”. El coeficiente tiene un dominio real acotado entre -1 y 1; si el coeficiente toma el valor de -1 indica que no hay coincidencia entre el agrupamiento teórico con el clasificado. Si el coeficiente toma el valor 0 indica que la coincidencia no es mejor que la producida al azar. Si toma el valor de 1 indica total acuerdo o perfecta coincidencia (Ormeño, 2006). Es bastante raro que se dé la última situación, no obstante se utilizará el valor que más se aproxime al mismo.
2. Optimización de la función de probabilidad condicionada. El desarrollo matemático así como su explicación rigurosa se puede encontrar en Swain y Davis (1978).
3. Análisis a posteriori. El primer análisis que se puede establecer puede ser la verificación de la normalidad de las clases. Para ello se revisan los coeficientes de asimetría y curtosis. Estos coeficientes tienen la ventaja de evitar el cálculo y gráfico de los histogramas para comparar clases clasificadas con clases asignadas. Separabilidad espectral. En esta parte se pretende analizar el estimador estadístico, que facilita el software SOV, distancia bhattacharyya. La forma en la que presenta los resultados es en forma de matriz en la que las filas y columnas coinciden con las clases de clasificación. Por lo tanto tendremos en cada elemento de dicha matriz la distancia bhattacharyya de una clase respecto de las demás. Finalmente el último paso sería la obtención de la fiabilidad de la clasificación para cada clase. Para esto, se utilizará la matriz de contingencia o de confusión. La diagonal principal de esta matriz muestra la fiabilidad de clasificación para la clase que se trate.

### 3.3.2 Modelo de clasificación II

Este modelo se calcula con el software ENVI 5.0. La diferencia de este modelo y el anterior se encuentra en los pasos definidos como 1 y 3. En el paso 1 se definen las áreas de entrenamiento de acuerdo a lo estudiado en el apartado del medio físico. De las distintas áreas de entrenamiento se obtienen los estimadores estadísticos básicos de cada área en cada banda de registro. Se crean gráficos y se estudia que tan separadas se encuentran unas firmas espectrales de las otras. Este paso también incluye el cálculo de la separabilidad espectral entre clases. Los estimadores que aplica son: distancia jeffries-matusita y la divergencia transformada. En el paso 3 la novedad se encuentra en que existe una función que realiza un muestreo aleatorio de las clases y las confronta

con las clases establecidas *a priori*. El resultado del paso 3 se da también en función de la matriz de contingencia.

### 3.3.3 Modelo de clasificación III

Este modelo difiere significativamente de los modelos anteriores. Los pasos 1 y 3 se establecen de forma visual y atendiendo a los resultados del análisis del medio físico. El modelo que aquí se propone es válido para imágenes registradas por el sensor ASTER, puesto que, su desarrollo y aplicación práctica es amplia según la literatura revisada. El paso 1 se realiza en función de las conclusiones del medio físico; por ejemplo, el caso de la paramera destaca por su gran contenido en carbonato cálcico y contenido moderado de hierro férrico. También se puede ver en las proximidades al río Ebro materiales con contenido en silicatos y óxido de silicio. Una vez realizado dicho reconocimiento, se crea un árbol de decisiones en el que cada nodo del árbol es la aplicación de la función discriminante; en este caso la función discriminante es el cociente entre bandas que maximiza la respuesta de un determinado material mineral. El aspecto que tiene el árbol de decisiones se puede ver en la siguiente figura.

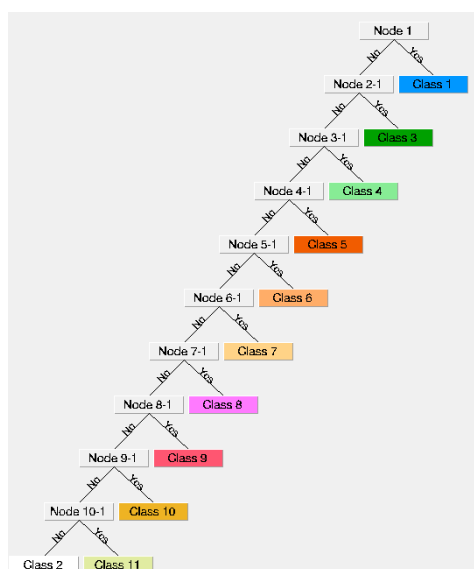


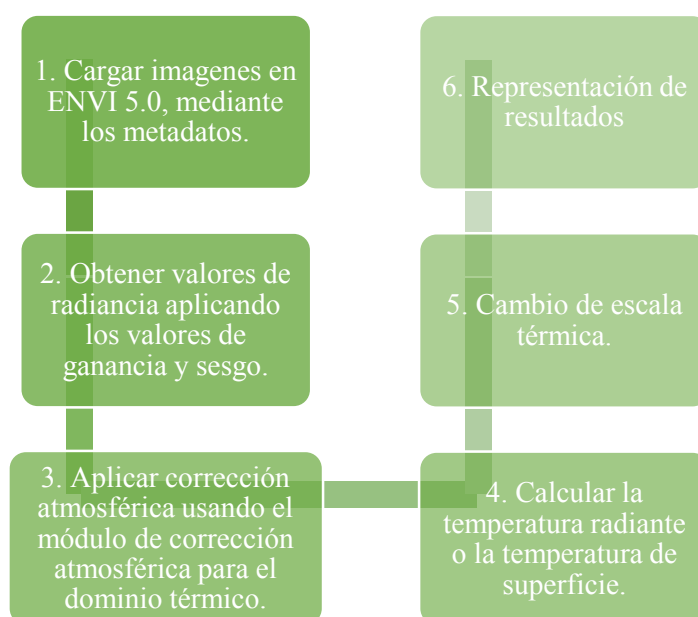
Figura 82: clasificación de material mineral según el modelo de clasificación III.

El paso 3 se puede desarrollar mediante análisis visual o mediante un reconocimiento en campo de los materiales clasificados. Esta última clasificación resulta de interés para encontrar, o mejor, tener localizada la zona en donde determinados materiales minerales sufren alteración por influencia de hidrocarburos, para el caso de este proyecto zonas con presencia de carbonato cálcico y óxidos de hierro.



### 3.4 Obtención de temperaturas

En cuanto a la relación geología-temperatura se plantea la siguiente hipótesis. Las distintas fracturas que se encuentran a lo largo del anticlinal de Ayoluengo, se traducen en tensiones que han superado el límite de deformación de la roca, provocando su ruptura en búsqueda de una nueva situación de equilibrio (situación que también favorece la génesis de rutas para posibles filtraciones de hidrocarburos). Si a este fenómeno también se le añade la presencia de un volumen de hidrocarburo en estado gaseoso que empuja en su entorno; se podría pensar que, la superposición de tensiones genere gradientes térmicos. El problema se encuentra en si dicho fenómeno es lo suficientemente significativo para apreciarse desde la distancia de registro de un sensor remoto. Con ayuda de lo estudiado en el medio físico se intentará buscar alguna anomalía. El procedimiento a seguir incluye el cálculo de temperatura radiante para las dos bandas del sensor OLI, con la finalidad de ver la variación por separado de cada una, y verificar si existe algún fenómeno fuera de lo corriente. Posteriormente se confrontará si existe alguna variación significativa entre la temperatura de superficie del año 89 registrada por el sensor TM 4 y el año 2003 por el sensor ASTER. La metodología seguida se resume en el siguiente flujo de trabajo.



#### 3.4.1 Temperatura radiante

Dado que el sensor OLI registra en dos bandas cuyo dominio espectral pertenece a la región térmica, se calcula la temperatura radiante; es decir, se considera que la sub-escena tiene una emisividad de 1. Se calcula la temperatura radiante para ambas bandas y se representan los resultados.

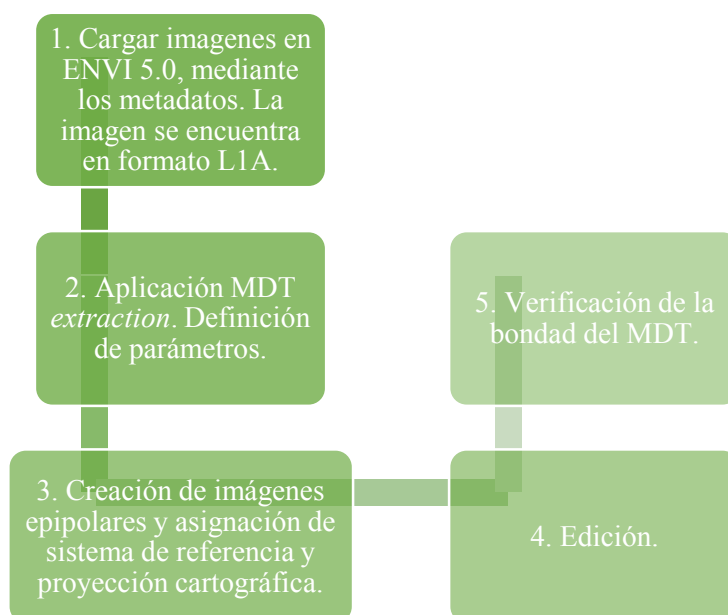
### 3.4.2 Temperatura de superficie

En este apartado se calcula la temperatura de superficie utilizando la emisividad del agua (0.95). Se obtiene la imagen correspondiente al sensor TM del satélite Landsat-4 y la imagen de temperaturas de superficie del sensor ASTER. Se representaron y evaluaron los resultados.

### 3.5 Obtención del Modelo Digital del Terreno de la escena registrada por el sensor ASTER

Aprovechando la simultaneidad de captura para una misma escena por los telescopios a bordo del sensor ASTER, uno en disposición nadiral (3N) y otro en disposición oblicua (3B), se calcula un MDT. Se piensa que es mejor tener una idea tridimensional del terreno, ya que facilita la visualización de los diferentes accidentes geográficos que se dan en la zona. También se evidenció que sólo existe un MDT que cubre la zona de interés (MDT 1:200.000 de la provincia de Burgos); dicho MDT tiene un paso de malla de 200 m. El MDT que se pretende obtener en esta sección tendrá una resolución de 15 m.

La metodología se resume en el siguiente diagrama de flujo. En los siguientes apartados se ahonda más en conceptos específicos a la hora de la obtención y verificación del MDT.



#### 3.5.1 Generación del MDT

A continuación se especifican los pasos correspondientes a la generación del MDT.

- I. Selección del par estereoscópico. Se utilizan las bandas 3N y 3B, del nivel L1A del sensor ASTER. Este nivel incorpora todas las correcciones en forma de metadatos. El formato en el que viene es en formato tipo HDF.
- II. Función de ENVI para crear MDT; *MDT extraction*. Para calcular el MDT se deben definir los siguientes parámetros:
  - Nº de puntos de unión: 65.
  - Dimensión matriz patrón: 81.
  - Dimensión del movimiento: 11.
  - Correlación mínima: 0.80.
  - Altitud media: 1000 m.

El paralaje, falta de coincidencia entre los haces correspondientes al par para un mismo punto del terreno, es función directa de los parámetros definidos anteriormente. Después de probar distintas combinaciones, considerando los conceptos de los mismos, se obtuvo un paralaje en Y de medio píxel, lo que se traduce en 7.5 m, si se considera la resolución espacial del par (15 m).
- III. Construcción de imágenes epipolares, es decir, punto del terreno en imagen 3N, punto del terreno en imagen 3B y punto del terreno en sí pertenecen a un mismo plano. Posteriormente se asigna un sistema de referencia espacial (en este caso WGS84) y una proyección cartográfica (UTM norte huso 30).
- IV. Edición y verificación de la bondad del MDT. Esta es la parte que valida o que descarta su utilización para las demás secciones.

### 3.5.2 Verificación del MDT

Para este propósito se distingue la planimetría de la altimetría. Para la planimetría se carga el mapa provincial de Burgos a escala 1:200.000 y la hoja 134 del MTN 1:50.000. También se superpuso la ortofoto del PNOA correspondiente a la hoja 134 del MTN 1:50.000.

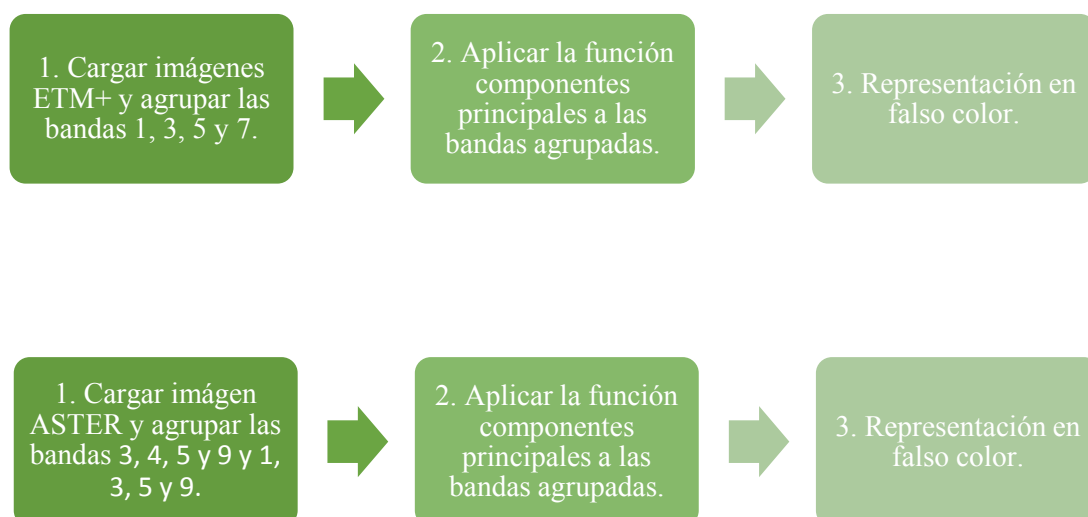
Para la verificación altimétrica se utilizaron los estadísticos correspondientes a la zona 1; dicha zona fue una extracción realizada del MDT del mapa provincial de Burgos a escala 1:200.000.

Se opta por este tipo de verificación ya que no se ha efectuado ningún tipo de campaña de campo. Un procedimiento riguroso incluiría el diseño de la campaña y la observación de la misma para la obtención de coordenadas en el sistema de referencia de interés. Se superpondrían dichos puntos al MDT calculado y se realizaría un análisis sobre su situación. Como no se dispone de dichos puntos se ha realizado de la manera desarrollada anteriormente.

### 3.6 Cálculo de anomalías en torno al campo petrolífero de Ayoluengo.

En el estado del arte se explicaron algunas de las metodologías desarrolladas para la evaluación de la medida en la que se encuentra influida una zona por filtraciones de hidrocarburos. En este apartado se aplicará dicha metodología y se evaluarán los resultados. Para aplicar la metodología sugerida se verificó, mediante el estudio del medio físico, que existen materiales en la zona 1 que son susceptibles de ser localizados mediante las diferentes funciones sugeridas por

las publicaciones estudiadas. Los siguientes diagramas de flujo muestran los pasos realizados, así como las funciones aplicadas a las imágenes capturadas por los sensores ETM+ y ASTER. Los datos han sido previamente adecuados (ver apartado 3.1).



### 3.6.1 Sensor ETM+

Para las imágenes capturadas por este sensor la literatura revisada sugiere la utilización de la función *componentes principales* para las bandas 1, 3, 4 y 5.

Se realizó un muestreo de la zona afectada y se calculó una clasificación atendiendo a los umbrales máximos del muestreo. Los resultados se proyectaron sobre la hoja 134 del MTN 1:50.000.

Se realizaron sendos zums en algunos sitios de interés que coinciden con puntos del MTN donde existen mecanismos de extracción de hidrocarburos.

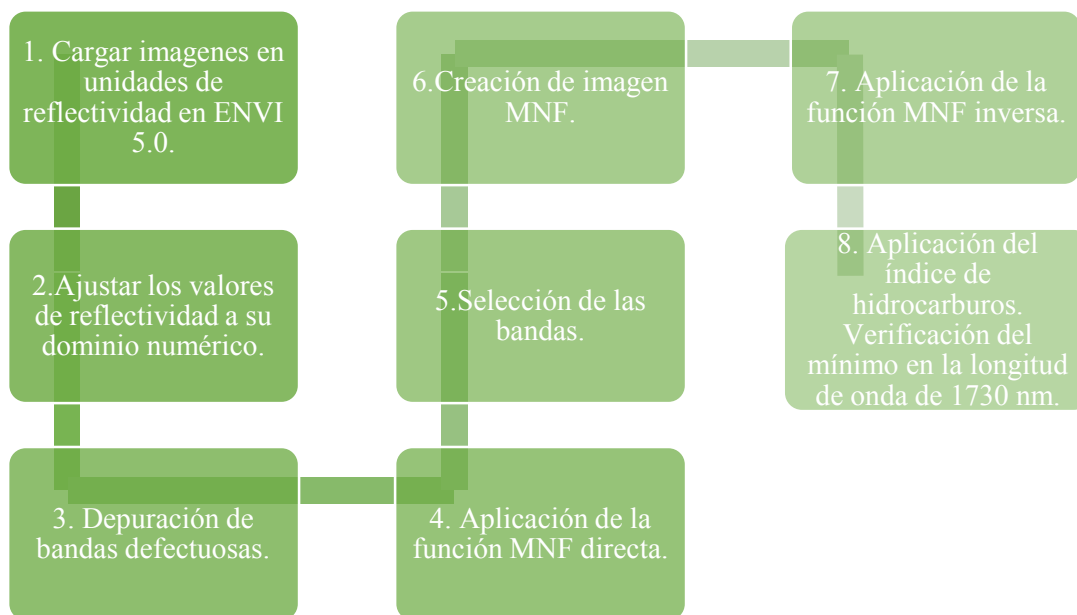
### 3.6.2 Sensor ASTER

Para la obtención de zonas con alto contenido en carbonato cálcico la literatura sugiere, o emplear cocientes entre bandas, o bien el uso de componentes principales y una combinación falso color. En este apartado se opta por la segunda solución ya que los ratios entre bandas no evidenciaron nada fuera de lo normal. Las bandas seleccionadas fueron 3, 4, 5 y 9 y la combinación de bandas es R (3), G (5), B (9).

Las bandas usadas para la representación de plausibles anomalías en suelos con contenido en óxido de hierro fueron 1, 3, 5 y 9. La composición falso color se realizó según la combinación R (5), G (4), B (3).

### 3.7 Localización directa de materiales con presencia de hidrocarburos mediante teledetección hiperespectral.

Los artículos revisados sugieren un índice de hidrocarburos para la localización de materiales con presencia de hidrocarburos. Este apartado aplica la metodología a las tres imágenes hiperespectrales. El siguiente diagrama de flujo muestra los pasos realizados; se parte de datos corregidos de la atmósfera mediante el módulo FLAASH.



#### 3.7.1 Creación de un hipercubo

Una forma de representar el conjunto de imágenes capturada por un sensor hiperespectral es a través de un hipercubo. En la siguiente imagen se puede ver el hipercubo utilizado para una de las imágenes que se va a utilizar.



Figura 83: hipercubo correspondiente a imagen hiperespectral.

Esto también ayuda a visualizar franjas espectrales anómalas, es decir, bandas espectrales que no registraron correctamente los datos. Esto se puede apreciar en esa franja continua azul en la imagen anterior.

### **3.7.2 Optimización de imágenes capturadas por el sensor Hyperion**

La optimización que se realiza en este apartado parte de la corrección atmosférica realizada y comentada en su correspondiente apartado. Los pasos restantes para una correcta optimización de los datos son:

- I. Ajuste de los valores de reflectancia a su dominio numérico; números reales comprendidos entre cero y uno.
- II. Depuración de bandas: este apartado utiliza la función *band animation* para revisar que las bandas que se van a utilizar no contienen errores groseros (*strip* u otros).
- III. Aplicación de la función MNF a los datos seleccionando, según gráfica, el umbral óptimo.

El paso número I resulta de interés dado que el módulo de corrección atmosférica FLAASH genera algunos valores definidos fuera del dominio numérico de la reflectividad. Una vez los datos han sido corregidos de los efectos atmosféricos, se pueden eliminar las bandas defectuosas (no se necesita en ningún otro paso las 242 bandas).

### **3.7.3 Aplicación del índice de hidrocarburos**

Para la realización de este apartado se cuenta con las imágenes tratadas anteriormente. Mediante un árbol de decisiones se escribe, en sintaxis IDL, el índice desarrollado por Khün y otros, y adaptado por Tian para el caso del sensor Hyperion. Se revisa que los valores cuyo índice de hidrocarburos es mayor que cero presenten el mínimo relativo correspondiente a la longitud de onda igual a 1730 nm.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados de aplicar la metodología expuesta anteriormente.

### 4.1 Validación geométrica

A continuación se muestran los resultados después de aplicar la superposición del MTN 1:50.000 a las distintas imágenes.

#### 4.1.1 Validación geométrica en imágenes multiespectrales

La siguiente imagen muestra los resultados de la validación geométrica.

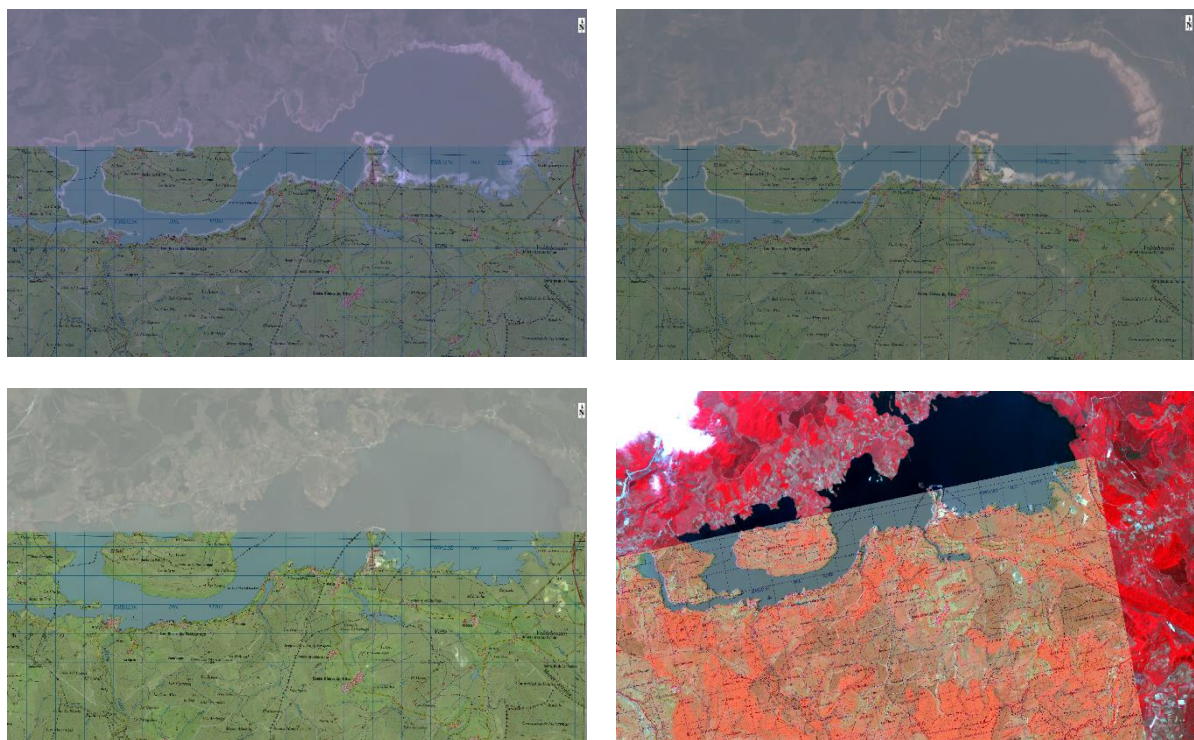


Figura 84: validación geométrica de imágenes multiespectrales. Imagen superior izquierda capturada por el sensor TM-4; imagen superior derecha capturada por el sensor ETM+; imagen inferior izquierda capturada por el sensor OLI; imagen inferior derecha capturada por el sensor ASTER.

Se puede ver en las imágenes cómo varía la cota de agua del embalse en función del tiempo; no obstante, el perímetro del MTN coincide con la máxima ocupación del mismo. En algunas imágenes se dispone del archivo de resultados de la georreferenciación calculadas por la estación de control en tierra.



### 4.1.2 Validación geométrica imágenes hiperespectrales.

En la siguiente imagen se puede ver el resultado de la metodología aplicada en la verificación geométrica.

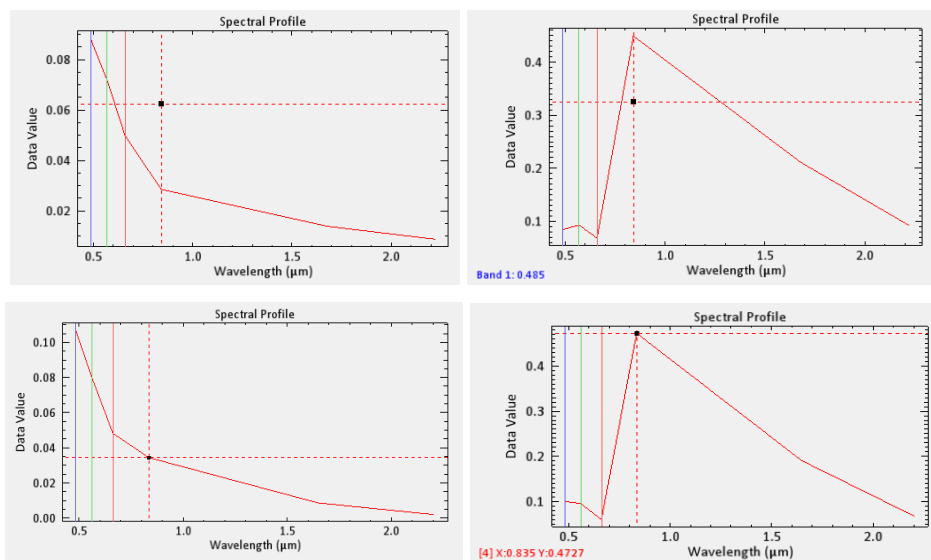


Figura 85: evaluación geométrica en imagen hiperespectral.

Se puede ver cómo el Puerto de Bilbao se ha desarrollado en los años posteriores al registro de la imagen por el sensor Hyperion.

### 4.2 Validación radiométrica

Los resultados de la aplicación de la metodología se muestran en la siguiente figura.





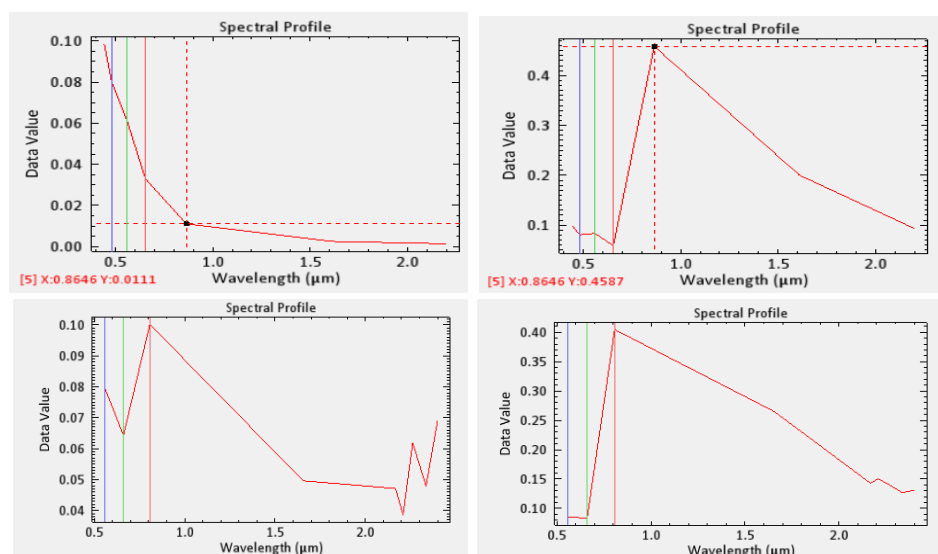


Figura 86: perfiles correspondientes al agua del embalse del Ebro (izquierda) y vegetación (derecha). De arriba a abajo: sensores TM-4, ETM+, OLI y ASTER.

Se evidencian rangos similares, lo que indica que los procedimientos de obtención de reflectividad son correctos. No obstante, se evidencia la falta de corrección atmosférica; dicha característica se ve en la región del azul de las firmas espectrales de la vegetación. Tendrían que ser mínimos relativos.

La validación radiométrica de las imágenes capturadas por el sensor Hyperion se realiza en el apartado de corrección atmosférica.

### 4.3 Corrección atmosférica

En este apartado se muestran los resultados de la corrección atmosférica. Se distinguen las imágenes hiperespectrales de las multiespectrales.

#### 4.3.1 Corrección atmosférica en imágenes hiperespectrales.

La siguiente figura muestra las imágenes después de la aplicación de la corrección atmosférica. Es importante reseñar que para el proceso de calibración en sensor (obtener valores de radiancia en lo alto de la atmósfera), así como para la obtención de reflectividad, es necesario contar con las 242 bandas.



*Figura 87: imágenes adquiridas por el sensor Hyperion y corregidas mediante el módulo de corrección atmosférica FLAASH. De izquierda a derecha, imagen más próxima a la escena 1 hacia el oeste. Imágenes próximas a la escena 1 dirección este (estas dos imágenes proceden de la misma zona pero en donde una tiene nubes la otra no).*

A continuación se pueden ver las imágenes hiperspectrales a las que se les ha aplicado la corrección atmosférica QUAC. Se ha aplicado un ajuste visual del histograma (ecualización) para apreciar mejor las diferencias.



*Figura 88: imágenes adquiridas por el sensor Hyperion y corregidas mediante el módulo de corrección atmosférica QUAC. De izquierda a derecha: Imagen más próxima a la escena hacia el oeste. Imágenes próximas a la escena dirección este (estas dos imágenes proceden de la misma zona pero en donde una tiene nubes la otra no).*

Visualmente ambos módulos generan resultados útiles. Destaca la necesidad de ajustar el histograma (en ambos módulos). No obstante, a continuación se procede con un análisis más riguroso. Se obtendrán firmas espectrales, de vegetación aparentemente sana, y se evaluará la calidad de la firma para cada imagen y para cada módulo de corrección.

---

Caso 1: Imagen al oeste respecto del área de interés.

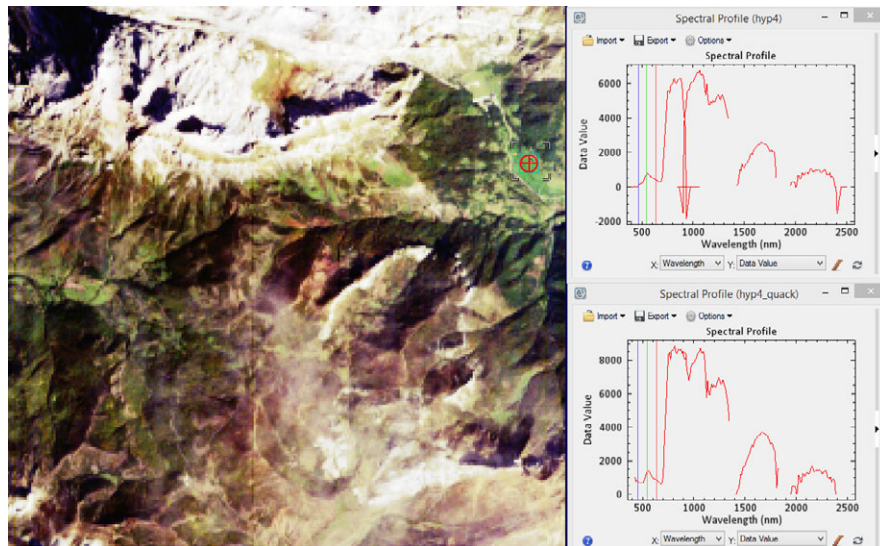


Figura 89: firmas espectrales para la imagen capturada al oeste del área de interés. Firma espectral superior de la imagen corregida mediante el módulo FLAASH. Firma espectral inferior de la imagen corregida mediante el módulo QUAC.

Caso 2: Imagen 1 al este respecto del área de interés.

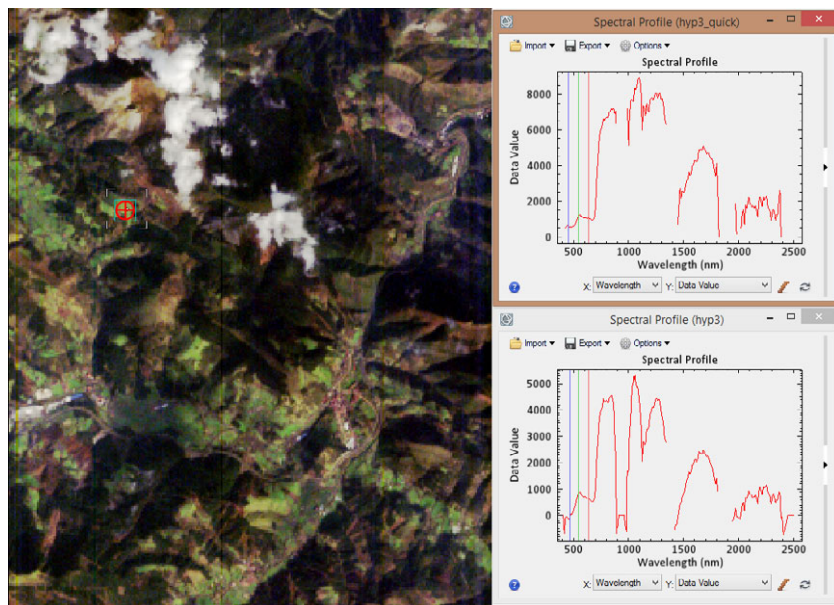


Figura 90: firmas espectrales para la imagen 1 capturada al este del área de interés. Firma espectral inferior de la imagen corregida mediante el módulo FLAASH. Firma espectral superior de la imagen corregida mediante el módulo QUAC.

Caso 3: Imagen 2 al este respecto del área de interés.

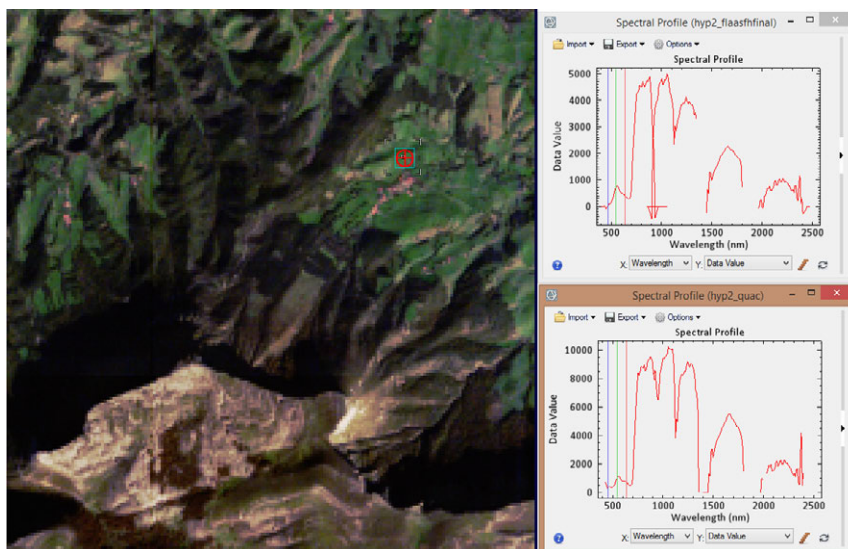


Figura 91: firmas espectrales para la imagen 2 capturada al este del área de interés. Firma espectral superior de la imagen corregida mediante el módulo FLAASH. Firma espectral inferior de la imagen corregida mediante el módulo QUAC.

Antes de sacar conclusiones se avisa sobre la falta de corrección y depuración de bandas defectuosas. Esto se manifiesta en esos extremos relativos que carecen de significado físico. También falta un ajuste de los valores de reflectividad a su dominio, números reales comprendidos entre 0 y 1. Una vez considerados los pasos de pre-procesado que faltan, se puede ver cómo las curvas espectrales son muy parecidas. Se ajustan, en su justa medida, a la firma espectral media de una cubierta vegetal sana. Se aprecia cómo, en general, la firma espectral obtenida aplicando el módulo QUAC tiene valores de reflectividad significativamente mayores. Esto puede deberse a que no se ha considerado el efecto de dispersión sobre la imagen, entre otras múltiples causas.

#### 4.3.2 Corrección atmosférica en imágenes multiespectrales

Para la corrección atmosférica del sensor ASTER sólo se puede utilizar el módulo FLAASH. El módulo QUAC, así como el módulo DOS, generan perfiles espectrales no aptos; esto se debe a la incompatibilidad de unidades.

Correcciones atmosféricas realizadas para las imágenes adquiridas por el sensor OLI. A continuación se muestran firmas espectrales de la imagen corregida por los siguientes módulos: DOS, QUAC y FLAASH.



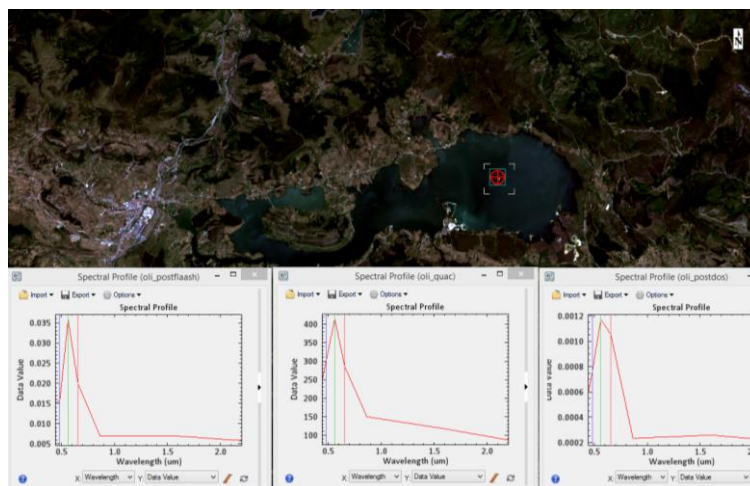


Figura 92: firmas espectrales correspondientes al área de interés. De izquierda a derecha, firma espectral obtenida de la imagen corregida utilizando el módulo FLAASH. Firma espectral obtenida de la imagen corregida utilizando el módulo QUAC. Firma espectral obtenida de la imagen corregida utilizando el módulo DOS.

El módulo que mejor trabaja en cuanto a manejo de datos, para los sensores ASTER y OLI es: FLAASH. Para el sensor OLI el módulo QUAC también proporciona buenos resultados. Los valores obtenidos por el método DOS son parecidos a los obtenidos con los otros módulos, pero destacan valores de reflectividad significativamente bajos; esto se puede dar por no haber localizado un elemento que sea totalmente oscuro y se esté restando a toda la escena parte de la reflectividad del objeto utilizado (embalse). Para esta comparación se re-escalaron los valores de reflectividad (0-1) obtenidos para los módulos FLAASH y DOS. Para el método DOS se definió una región de interés que contiene los píxeles más oscuros en la región del infrarrojo térmico de la zona del embalse (por su comportamiento como cuerpo negro).

Para finalizar este apartado se obtienen métodos de corrección atmosférica para datos registrados por los sensores: TM y ETM+. Se verifican los modelos programados en Matlab con los resultados generados por el software R y para finalizar se calcula el NDVI como aplicación práctica.

El software de libre distribución R dispone de un paquete (Landsat) que aplica tres de los cuatro modelos expuestos anteriormente. Dicho paquete va a ser la referencia a utilizar para saber si los modelos programados en Matlab son correctos. En primer lugar se define la siguiente matriz:

$$T = \begin{pmatrix} 50 & 100 \\ 150 & 200 \end{pmatrix};$$

Dicha matriz va a ser usada para verificar los datos en Matlab. Finalmente se añade una tabla en la que se muestra el valor del ND = 200, una vez se han aplicado los modelos vistos anteriormente; dicha tabla contiene valores obtenidos mediante R y Matlab.

Para establecer la banda patrón de la que se va a extraer el VMI se calcularon las tablas correspondientes a las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 del sensor ETM+. A continuación se muestran las tablas correspondientes a las bandas 1 y 5, así como una tabla que incluye el ND mínimo de cada banda.

Tabla 14: tabla que asigna un VMI para cada banda en función de la bruma presente en la escena.

Banda 1					
	coef-4	coef-2	coef-1	coef-0.7	coef-0.5
band1	45.55698	45.55698	45.55698	45.55698	45.55698
band2	28.36468	35.73326	40.29259	41.79322	42.83021
band3	17.71169	27.47565	35.13455	37.93159	39.94518
band4	10.72354	19.51082	29.08081	33.12237	36.20682
band5	6.54297	9.64572	17.80355	22.93181	27.56053
band7	6.339085	8.125627	14.83698	19.8029	24.62208

Tabla 15: tabla que asigna un VMI para cada banda en función de la bruma presente en la escena.

Banda 5					
	coef-4	coef-2	coef-1	coef-0.7	coef-0.5
band1	5.260705	5.260705	5.260705	5.260705	5.260705
band2	5.68761	5.504639	5.391426	5.354163	5.328414
band3	5.952136	5.709685	5.519506	5.450052	5.400052
band4	6.125659	5.907461	5.669827	5.569471	5.49288
band5	6.229468	6.152423	5.949855	5.822514	5.707577
band7	6.23453	6.190169	6.023518	5.900208	5.780543

Tabla 16: ND mínimo registrado para cada banda capturada por el sensor ETM+.

Nº Banda	ND mínimo	Coefficiente
1	46	-4
2	33	-4
3	25	-4
4	16	-4
5	8	-4
7	6	-4

De estas tablas se puede deducir que, la que mejor se ajusta a los valores mínimos registrados es la banda 1. A medida que aumenta el número de banda, en las tablas, los resultados se alejan de los niveles digitales mínimos de cada banda. Por ejemplo, la tabla correspondiente a

la banda 5 asigna un VMI de 5.26 a la banda 1, cuando el ND mínimo registrado en dicha banda es de 45. La escena, según la clasificación de Chavez, se encontraba muy despejada (coeficiente -4). La columna perteneciente a este coeficiente establece los VMI que se van a usar para la obtención de reflectividad por otros métodos.

Una vez obtenidos los VMI se procede con la verificación de modelos. Para la verificación se usó la matriz T pero en la tabla que se adjunta sólo se muestran los valores de reflectividad para un ND de valor igual a 200.

Tabla 17: verificación modelos DOS programados en Matlab.

Verificación modelos DOS (ND=200)		
Modelo	R	Matlab
Reflectividad aparente	0.68481	0.68485
DOS-1	0.64593	0.64596
DOS-2	0.75553	0.75557
DOS-3	NA	0.67156
DOS-4	0.67704	0.67696

Como se puede ver los valores coinciden sensiblemente con los obtenidos con R. Se dan por válidos los modelos programados y se procede a la aplicación práctica.

En esta parte se van a realizar dos procesos. En primer lugar se va a utilizar la banda 4 y se le va a aplicar los modelos descritos anteriormente. En segundo lugar se procede al cálculo del *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*, se corregirán las bandas involucradas en su cálculo y en el apartado 4 se evaluarán resultados.

Obtención de banda 4 (en niveles de reflectividad) perteneciente a la sub-escena registrada por el sensor ETM+. En las siguientes figuras se aprecia, en primer lugar, la banda 4 de la sub-escena registrada por el sensor ETM+ (figura 93); la representación se ha efectuado en escala de grises. En segundo lugar, para apreciar mejor las diferencias, se ha modificado la escala de color; se ha optado por una escala de color tipo jet (figura 94). Es importante señalar que en estas imágenes no se ha realizado ninguna función sobre el histograma; sólo se han re-escalado los valores para su representación en el dominio de la reflectividad (números reales comprendidos entre 0 y 1).

Finalmente se procede al cálculo del *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*. Dicho índice se calcula mediante la siguiente fórmula (caso sensor ETM+):

$$NDVI = \frac{Banda_4 - Banda_3}{Banda_4 + Banda_3}$$

Dicho índice de vegetación ha resultado de gran utilidad para discernir cubiertas vegetales. En este caso se utiliza para verificar que la corrección atmosférica es válida. Se cargaron las

bandas 2,3 y 4 de la sub-escena registrada por el sensor ETM+. En la figura 95 se muestra la imagen correspondiente al Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en combinación RGB, ídem anterior pero en combinación escala *color jet* y finalmente se clasifica la imagen NDVI en función de los siguientes umbrales (USGS Remote Sensing Phenology): vegetación densa (0.6-1), vegetación dispersa (0.2-0.5). Dicha clasificación se proyecta sobre la banda 2.





*Figura 93: sub-escena (zona 1) correspondiente a la banda 4 corregida atmosféricamente mediante el modelo DOS. Imágenes en escala de grises.*

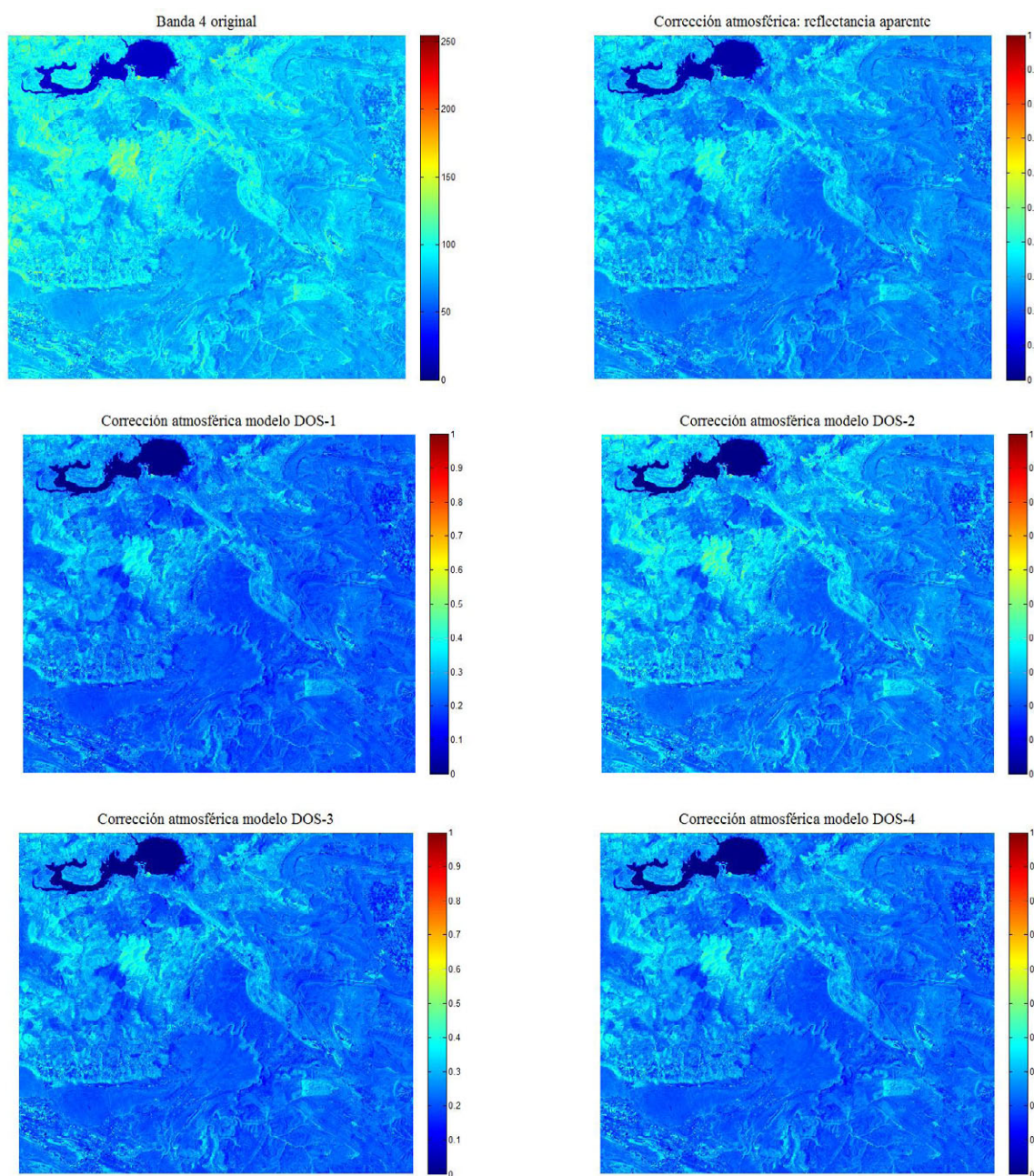


Figura 94: sub-escena (zona 1) correspondiente a la banda 4 corregida atmosféricamente mediante el modelo DOS. Imágenes en escala de color jet.



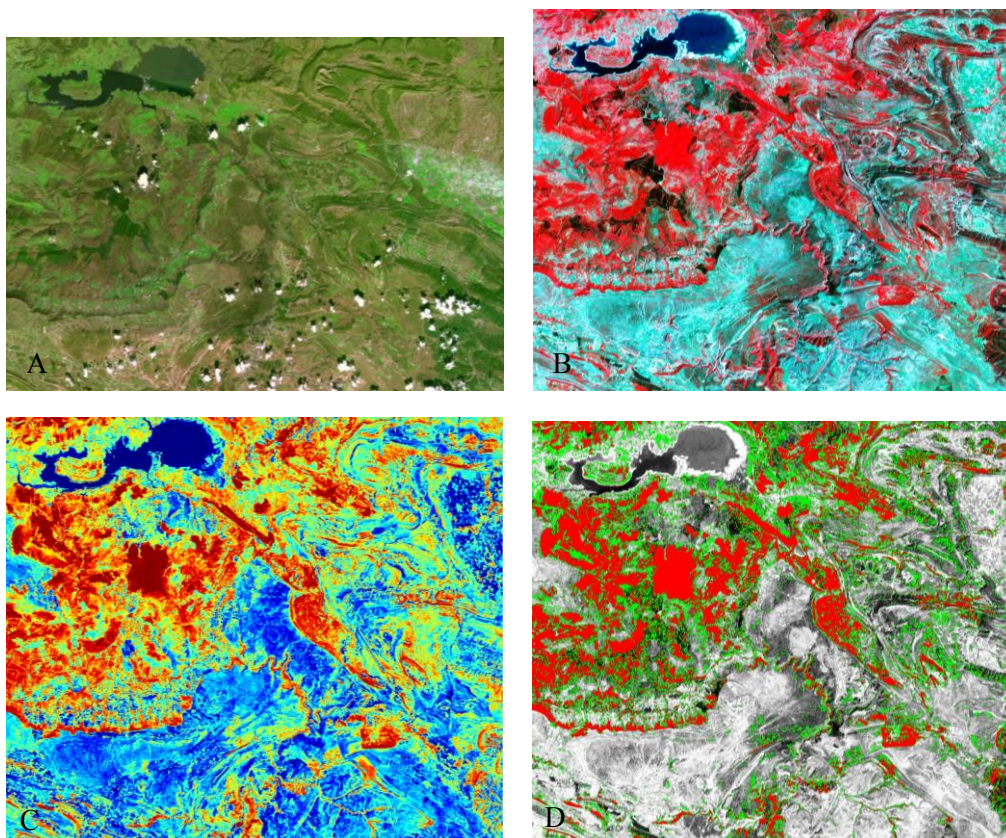


Figura 95: aplicación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. A) Imagen capturada por el sensor SPOT (Fuente: IBERPIX). B) NDVI calculado para las bandas 3 y 4 de la sub-escena registrada por el sensor ETM+. C) Ídem B) pero en escala color jet. D) Clasificación: vegetación densa (roja) y vegetación dispersa (verde). Dicha clasificación fue proyectada sobre la banda 2.

Los resultados se consideran válidos para el propósito que se persigue. Los valores de reflectividad asociados a un nivel digital igual a doscientos son muy similares. Los parámetros estadísticos básicos fueron los siguientes:

- Promedio: 0.68695.
- Desviación estándar:  $\pm 0.04101$ .
- Valor máximo: 0.75557.
- Valor mínimo: 0.64596.
- Diferencia máximo y mínimo: 0.10961.

Se evidencia un valor muy similar para los modelos DOS-3 y DOS-4, aunque es lógico que este último sea mayor dado que considera la absorción. El número de iteraciones necesarias en el modelo DOS-4 para la banda 4 se muestra en la siguiente figura:

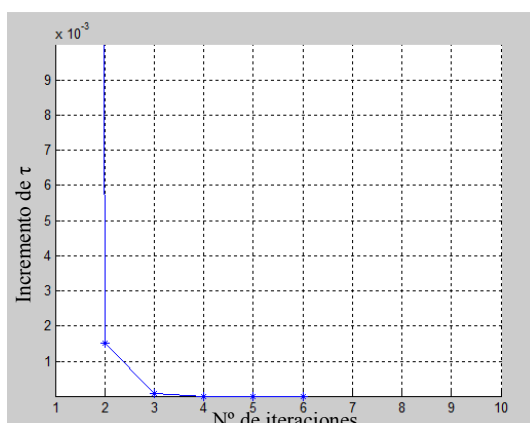


Figura 96: estabilización de  $\tau$  para el modelo DOS-4.

La estabilización de  $\tau$  se consigue en la sexta iteración. Los resultados gráficos muestran ligeras diferencias; la utilización de la escala de *color jet* favorece la interpretación de la subescena. Finalmente la clasificación de la imagen NDVI se ajusta bastante bien, sin considerar escala temporal y variacional, a los patrones naturales (tono del tipo de vegetación) que muestra la imagen obtenida mediante IBERPIX.

#### 4.4 Clasificaciones

En este apartado se muestran los resultados de los modelos propuestos en el capítulo de metodología.

##### 4.4.1 Modelo de clasificación I

En la siguiente imagen se puede ver la evolución del coeficiente kappa en función del número de clases.

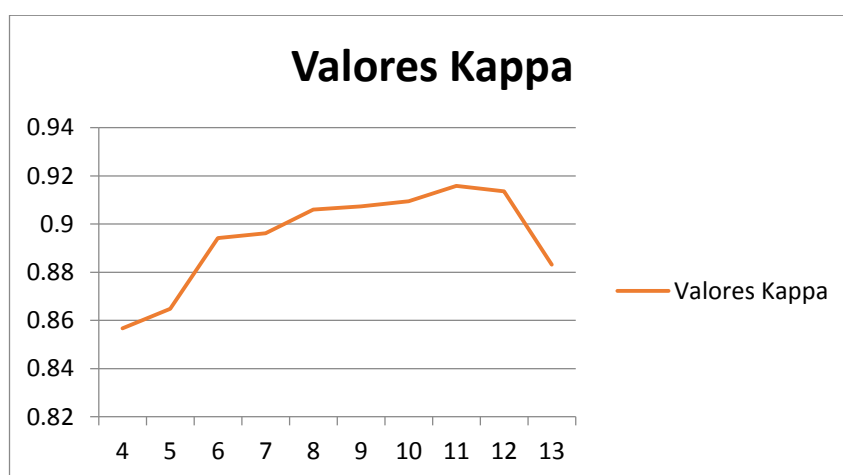


Figura 97: evolución del coeficiente kappa en función del número de clases.

De la anterior gráfica se deduce que existe un rango de clases que presenta mayor proximidad a la unidad del coeficiente kappa. Dicho rango va de 8 a 11 clases. La siguiente imagen muestra la clasificación supervisada utilizando el coeficiente kappa óptimo.

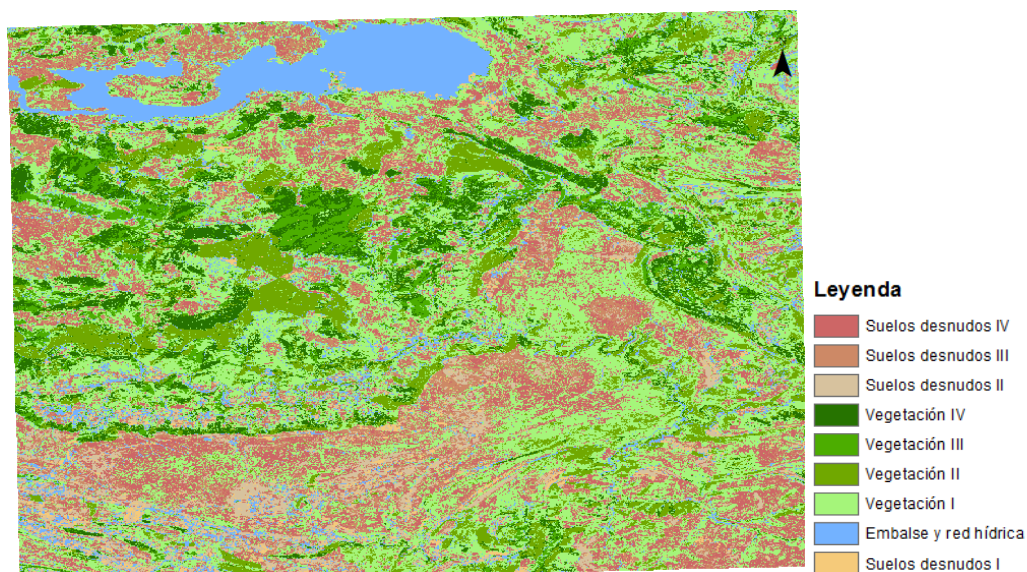


Figura 98: clasificación supervisada considerando el número de clases que presentan un coeficiente kappa óptimo.

Las siguientes tablas muestran los resultados atendiendo a la separabilidad espectral y a la fiabilidad de la clasificación.

Tabla 18: distancia bhattacharyya clasificación imagen TM-4.

Distancia Bhattacharyya							
0	1.7863	2.4534	3.518	4.2	6.7565	6.521	5.1658
1.7863	0	1.4345	3.2124	3.2051	5.6878	3.5413	2.387
2.4534	1.4345	0	7.833	3.7135	18.6696	11.6939	8.4661
3.518	3.2124	7.833	0	3.0184	26.2252	19.1199	13.7978
4.2	3.2051	3.7135	3.0184	0	45.5198	28.1157	19.9576
6.7565	5.6878	18.6696	26.2252	45.5198	0	2.4742	4.5269
6.521	3.5413	11.6939	19.1199	28.1157	2.4742	0	1.9462
5.1658	2.387	8.4661	13.7978	19.9576	4.5269	1.9462	0

En la tabla se puede ver cómo la mayor separabilidad espectral se da entre la clase seis y la clase cinco. No pasa inadvertido el hecho de que la diagonal principal sea todo ceros; esto se debe a que no existe separabilidad espectral para una misma clase. La mínima DB se da para las clases 3 y 2.

Finalmente el último paso sería la obtención de la fiabilidad de la clasificación para cada clase. Para esto se utilizará la matriz de contingencia o de confusión.

Tabla 19: matriz de contingencia para la clasificación de la imagen capturada por el sensor TM-4.

Matriz de Confusión (%)							
97.8723	2.1277	0	0	0	0	0	0
10.3448	41.3793	27.5862	3.4483	0	0	3.4483	13.7931
0	3.2787	95.082	0	1.6393	0	0	0
2.7778	2.7778	0	83.3333	11.1111	0	0	0
0	0	0	0	100	0	0	0
0	0	0	0	0	94.7368	5.2632	0
0	0	0	0	0	10	80	10
0	0	0	0	0	0	11.7647	88.2353

La diagonal principal de esta matriz muestra la fiabilidad de clasificación para la clase que se trate. Por ejemplo la clase dos tiene una fiabilidad del 41.4 %. En general se busca estar en una fiabilidad superior al 80%, pero depende siempre de la naturaleza del proyecto. En este caso dicha clase se debería agrupar con otra. Dado que este apartado sólo sirve para establecer un modelo no se itera.

#### 4.4.2 Modelo de clasificación II

En la figura 99 se puede ver la respuesta espectral de distinto tipo de material que compone la sub-escena (zona 1). Las barras perpendiculares indican la desviación estándar de las muestras. En esta gráfica se puede ver como algunas clases que aparentemente muestran diferencias significativas, en combinación falso color o color verdadero, a la hora de la evaluación espectral presentan tendencias bastante similares; esto sucede, por ejemplo, entre las clases denominadas como “caliza I y caliza II”. Otro rasgo característico se encuentra en los valores registrados para el río Ebro. Dado que el mismo no presenta un ancho suficiente para distinguirlo con la mínima unidad de resolución del terreno del sensor, manifiesta un máximo, en este caso absoluto, en la banda 4; característica que no coincide con los valores registrados para el caso del embalse, el cual presenta una curva monótona decreciente. A partir de estas características se puede refinar el espacio de muestras, aumentándolo o utilizar cocientes entre bandas para aumentar la diferencia entre bandas y por medio de una clasificación en árbol de decisiones realizar una clasificación.

Dado que el objetivo de estas clasificaciones es ver la respuesta espectral de los distintos materiales que componen la zona 1 para la evaluación final de la zona afectada por hidrocarburos, se reduce el número de clases a 8; no obstante, en la evaluación desde una perspectiva inferencial se prestará atención a la separabilidad entre clases por si la misma contradice lo expuesto anteriormente.

En la tabla 20 se puede ver la separabilidad espectral entre clases. El software ENVI calcula dos coeficientes que evalúan la separabilidad, la distancia Jeffries-Matusita y la divergencia

transformada. En contradicción con los resultados anteriores parece que existe una buena separabilidad espectral entre las 10 clases seleccionadas. El valor máximo se encuentra en 2 y significa que las clases son completamente diferentes y el valor de 0 se traduce en coincidencia entre clases. La separabilidad espectral más baja se encuentra entre suelo vegetal moderado y río Ebro, las razones pueden ser las comentadas anteriormente. El software calcula sendos valores de cada función para cada par de clases; finalmente genera un resumen ordenado de menor a mayor (tabla 20) en el que asigna el menor valor, independiente de la función que ha utilizado, al primer elemento de la tabla.

Tabla 20: separabilidad espectral entre clases. Método divergencia transformada y distancia jeffrias-matusita.

SueloVegetalModeradoandEbro-	1.5
CALIZA(I)andDesnudosII-	1.6
SueloVegetalModeradoandSueloVegetalDenso-	1.6
DesnudosIandDesnudosII-	1.6
SueloVegetalDensoandEbro-	1.7
SueloVegetaDispersaandEbro-	1.7
SueloVegetaDispersaandSueloVegetalModerado-	1.8
CALIZA(I)andSueloVegetaDispersa-	1.9
SueloVegetaDispersaandDesnudosI-	1.9
CALIZA(I)andDesnudosI-	1.9
SueloVegetaDispersaandDesnudosII	2
SueloVegetaDispersaandSueloVegetalDenso-	2
EbroandDesnudosI-	2
SueloVegetalModeradoandDesnudosI-	2
EbroandDesnudosII-	2
EmbalseandEbro-	2
CALIZA(I)andEbro-	2
SueloVegetalModeradoandDesnudosII-	2
CALIZA(I)andSueloVegetalModerado-	2
SueloVegetalDensoandEmbalse-	2
SueloVegetalDensoandDesnudosI-	2
SueloVegetalDensoandDesnudosII-	2
SueloVegetalModeradoandEmbalse-	2
CALIZA(I)andSueloVegetalDenso-	2
EmbalseandDesnudosI-	2
EmbalseandDesnudosII-	2
CALIZA(I)andEmbalse-	2
SueloVegetaDispersaandEmbalse-	2



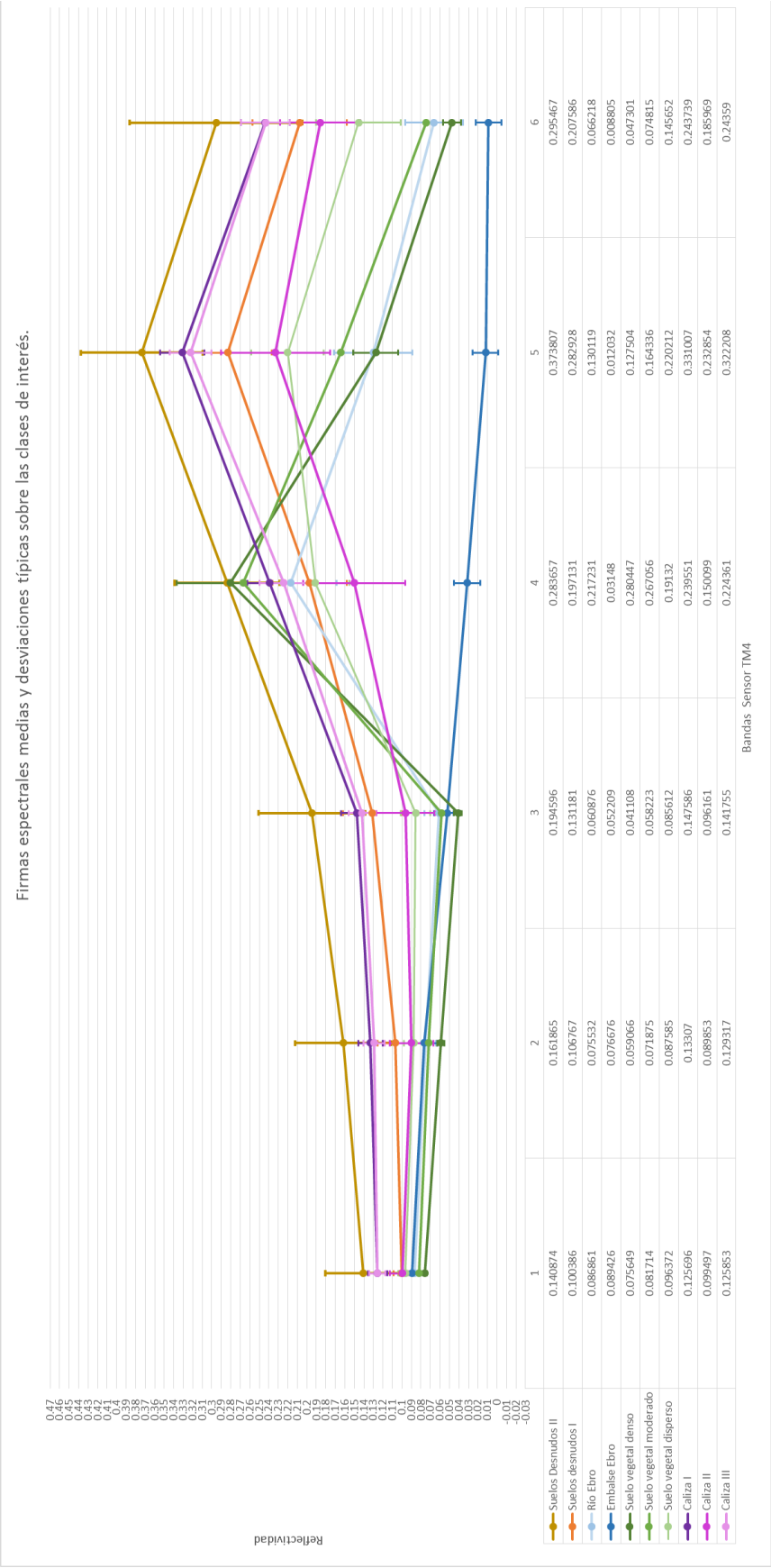


Figura 99: separabilidad espectral para sub-escena registrada por el sensor TM4





Los resultados de la clasificación se muestran en la siguiente imagen.

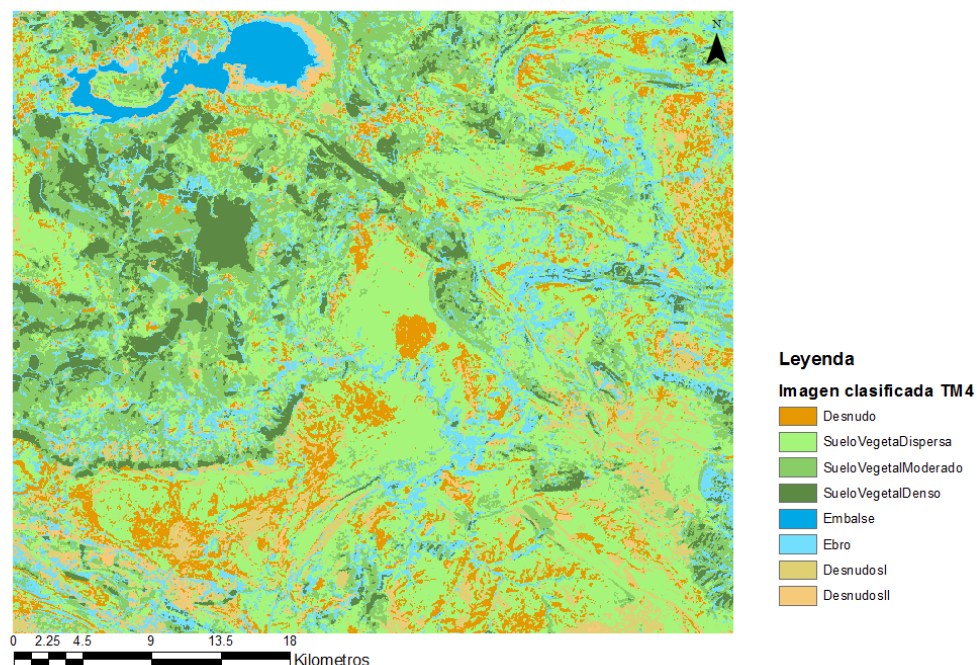


Figura 100: clasificación supervisada aplicando el modelo II.

La fiabilidad de la clasificación se muestra en la siguiente tabla.

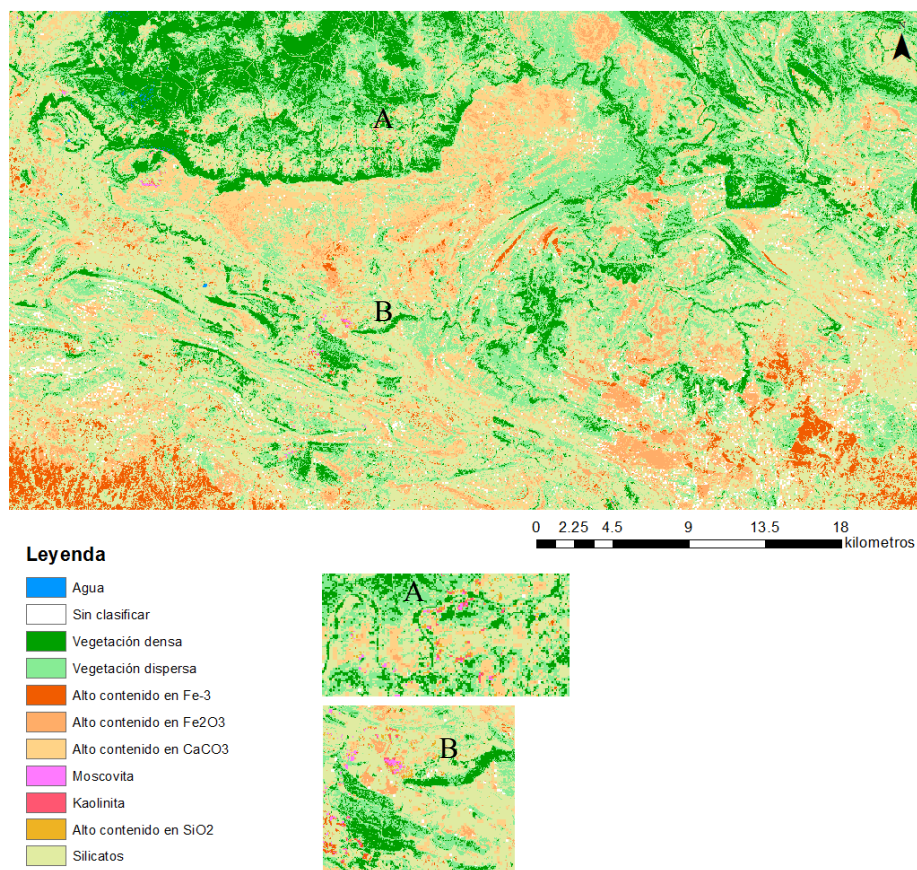
Tabla 21: matriz de contingencia correspondiente al modelo de clasificación II.

Class	Desnudos	SueloVegetaDi	SueloVegetaIM	SueloVegetaID	Embalse	Ebro	DesnudosI	DesnudosII	Total
Unclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CALIZA	98.81	0.55	0	0	0	0	1.4	16.62	5.11
SueloVegetaDi	0.15	88.99	1.63	0	0	0	0.61	0.5	20.94
SueloVegetaIM	0	7.45	95.05	2.45	0	4.35	0	0	16.71
SueloVegetaID	0	0	2.97	95.35	0	5.43	0	0	23.12
Embalse	0	0	0	0	100	0	0	0	18.7
Ebro	0	1.6	0.36	2.2	0	90.22	0.61	0.4	1.43
DesnudosI	0	1.41	0	0	0	0	96.86	18.58	7.63
DesnudosII	1.04	0	0	0	0	0	0.52	63.9	6.36
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Como se puede apreciar en la diagonal principal de la matriz de contingencia (tabla 21), la fiabilidad de las clases es bastante buena. La peor situación se da para la clase “suelo vegetal disperso”, mientras que la mejor situación se da para la clase “embalse”. El valor del coeficiente kappa es de 0.90 y la precisión global de la clasificación es del 92%.

#### 4.4.3 Modelo de clasificación III

Para distinguir la vegetación dispersa de la densa se utilizó el NDVI, con los rangos (0.2-0.5) para vegetación dispersa y  $>0.5$  para vegetación moderada. Para distinguir la red hídrica se utilizó el ratio entre bandas B1/B3 (para todos los cocientes se seleccionaron los umbrales en los que el mineral o característica de interés presentaba su valor máximo). Para localizar materiales con alto contenido en hierro férrico se utilizó el ratio entre bandas B2/B1. Los materiales que predominan en la paramera son fundamentalmente materiales con alto contenido en carbonato cálcico (calizas y dolomías); en bajo porcentaje y lugares concretos se puede localizar materiales con presencia de óxidos de hierro; los ratios utilizados para identificar ambos compuestos químicos fueron los cocientes B4/B3 y B13/B14. La presencia de minerales específicos como moscovita y caolinita se puede obtener con los ratios B7/B6 y B7/B5; como no resulta muy abundante se hizo un zoom de una zona donde se localizaron ambos. Finalmente se clasificaron las zonas con alto contenido en silicatos y alto contenido en óxido de silicio (compuestos que se dan en algunas formaciones sedimentarias como podrían ser bancos de arena, llanuras aluviales, etc.); para este cometido se usaron los ratios B13/B10 y B13/B7. Los resultados se pueden apreciar en la siguiente figura.





*Figura 101: clasificación no supervisada aplicando el modelo III.*

En este caso no se maximizó ninguna función discriminante; sólo se utilizaron los ratios sugeridos por varias publicaciones. Como comprobación se descargaron imágenes de vuelos fotogramétricos pertenecientes al programa PNOA y se verificó de manera visual que los resultados eran coherentes (en la medida en la que se ha podido evaluar). También se utilizó la parte del estudio del medio físico para dar validez a esta clasificación. Se encuentra coincidencia entre las distintas clasificaciones realizadas para los suelos, en cuanto a formación y evolución con los valores representados. Es evidente que la validez es una hipótesis ya que faltaría un reconocimiento en campo de la clasificación que aquí se propone. En la siguiente imagen se puede establecer una comparación visual entre la fotografía aérea y la imagen clasificada.



*Figura 102: comparación visual entre la clasificación III y la ortofoto del PNOA. Fuente ortofoto: IGN.*

Los suelos que tienden a tono más pardo oscuro, o rojizo, fueron clasificados con alto contenido en óxido de hierro. El material predominante de la plataforma (indicado por la cartografía geológica y otros) coincide con los óxidos de hierro (localizado en lugares puntuales) y carbonato cálcico (donde se manifiesta en la mayor parte de la paramera y alrededores) clasificado sobre la misma. Esta clasificación es necesaria para el propósito que se persigue, ya que los siguientes procedimientos que se van a realizar buscan anomalías en carbonatos, óxidos de hierro y otros. Si no existiese conocimiento sobre la presencia y distribución de dichos materiales, aplicar la metodología sugerida por dichas publicaciones carecería de sentido.

#### 4.5 Obtención de temperaturas

En este apartado se muestran los resultados de aplicar la metodología comentada en el capítulo anterior.

##### 4.5.1 Temperatura radiante

Como se explicó anteriormente el sensor OLI cuenta con dos bandas en la región térmica. Aplicando los procedimientos explicados se obtienen los siguientes resultados.

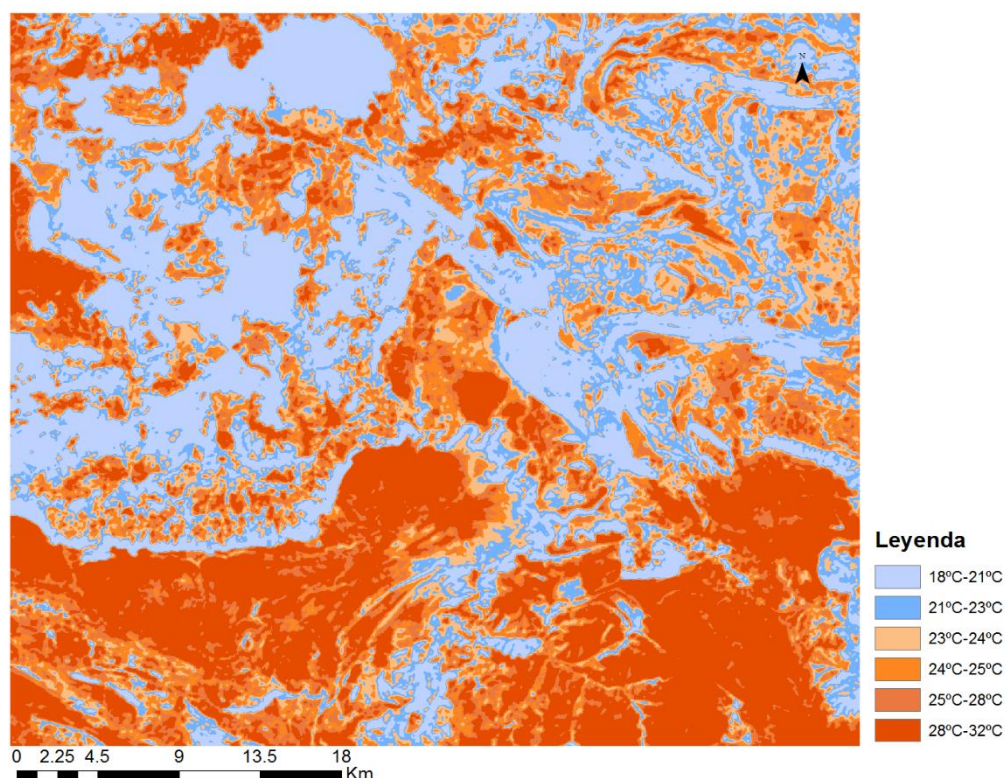


Figura 103: temperatura radiante registrada por la banda térmica 1 del sensor OLI.

Dado que se está comparando una misma escena, capturada para un mismo instante, donde lo único que varía es la región de registro del espectro electromagnético, se utilizan diferentes escalas cromáticas.



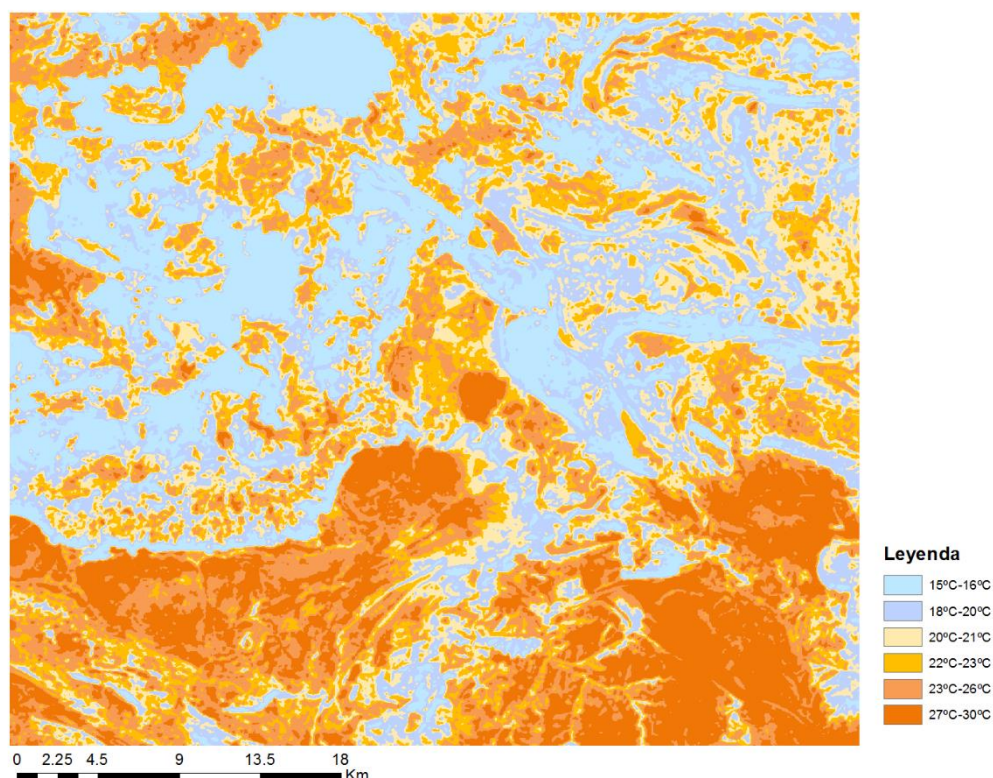
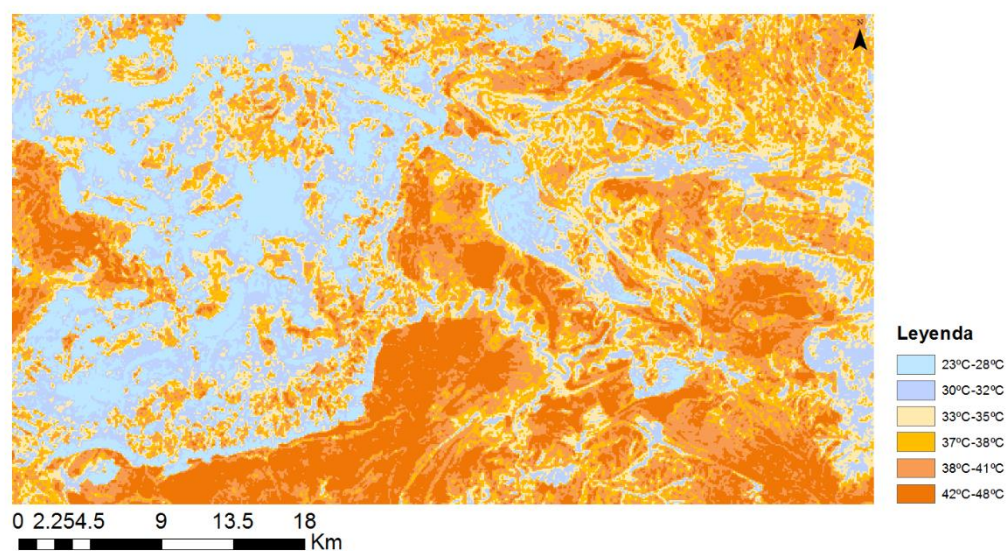


Figura 104: temperatura radiante registrada por la banda térmica 2 del sensor OLI.

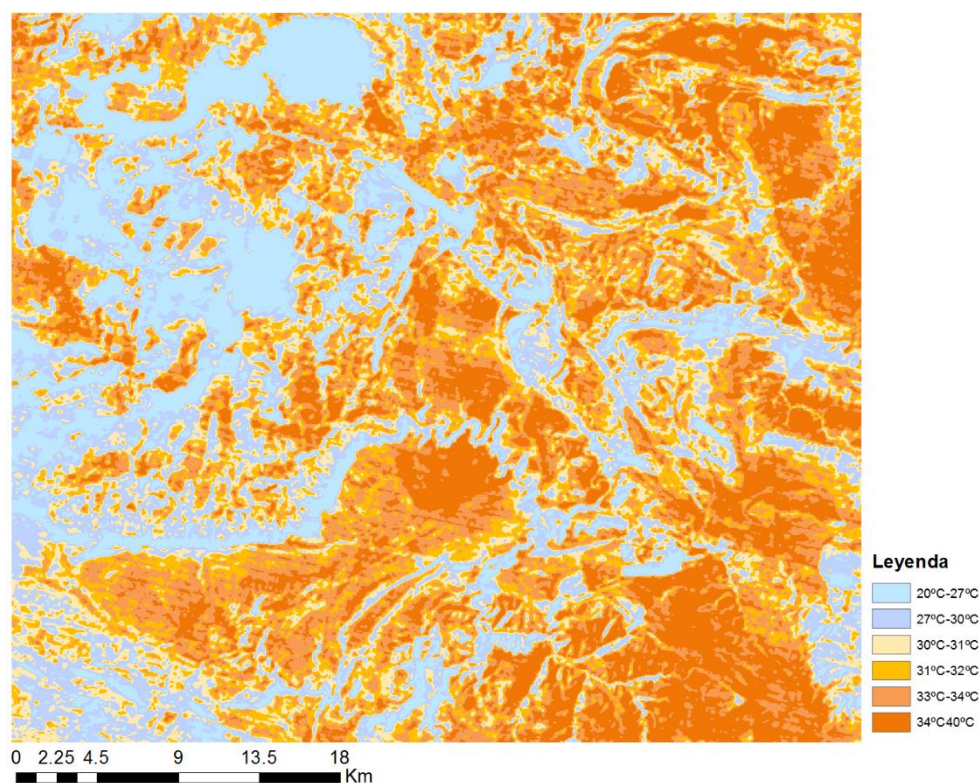
Los resultados entre las bandas 1 y 2 de la región térmica del sensor OLI muestran una discrepancia entre 1 y 2°C para los rangos definidos. Para la obtención de esta cartografía se realizó una conversión de ND a valores de radiancia. Posteriormente se realizó una corrección atmosférica (especificada para la región térmica) basada en los propios datos de la imagen. Finalmente se obtuvo la temperatura radiante con una función definida en ENVI (también se podía realizar utilizando la función *band math*).

#### 4.5.2 Temperatura de superficie

En este apartado se presentan los resultados correspondientes a la temperatura de superficie registrada por los sensores TM y ASTER. En las siguientes imágenes se pueden ver los resultados.



*Figura 105: temperaturas de superficie obtenidas mediante el sensor ASTER*



*Figura 106: temperaturas de superficie obtenidas mediante el sensor TM-4.*

Los resultados de comparar la imagen ASTER y la TM-4 podrían indicar cómo la acción erosiva ha desmantelado parte de la paramera, la cual, al estar en situación de biostasia,



presentaba unos valores térmicos más bajos (TM-4) que en el instante de captura de imagen por el sensor ASTER. La vegetación presente ayuda a disminuir la temperatura del suelo absorbiendo gran parte de la radiación incidente. Esta notificación también la presenta el artículo utilizado en el estudio del medio físico (CASAS C., 1992).

Una situación que se pone de manifiesto es la baja temperatura, comparada con las demás de la zona, a la que se encuentra la zona del cañón del Ebro, a la cual se le hizo referencia en la parte de climatología en el estudio del medio físico.

Desafortunadamente en este cálculo existen demasiadas variables que influyen en la fiabilidad de los datos que se obtienen. Algunos de estos inconvenientes podrían ser la altura del sol, el momento del día, la velocidad y orientación del viento, las precipitaciones, etc. Por este motivo aunque se pueda obtener información útil, en un principio, no se considera que se pueda representar por esta técnica el fenómeno planteado inicialmente.

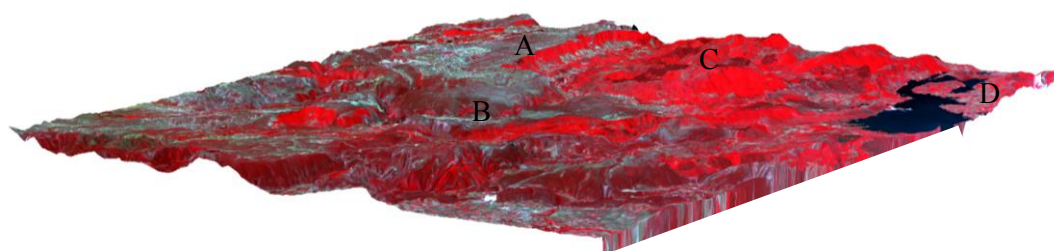
#### **4.6 Obtención del MDT**

En este apartado se presentan los resultados de la obtención del MDT obtenido para el par estereoscópico registrado por el sensor ASTER. Sobre el MDT de la zona 1 se proyectaron las bandas 1, 2 y 3 del sensor ASTER.

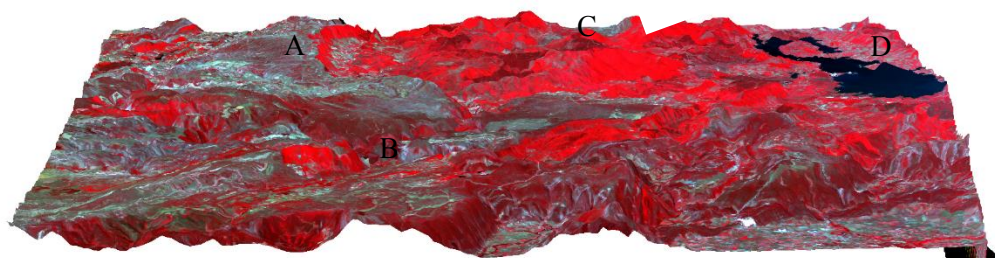
##### **4.6.1 MDT zona 1**

Las siguientes imágenes muestran el MDT de la zona 1 desde diferentes perspectivas.

MDT dirección noreste-suroeste

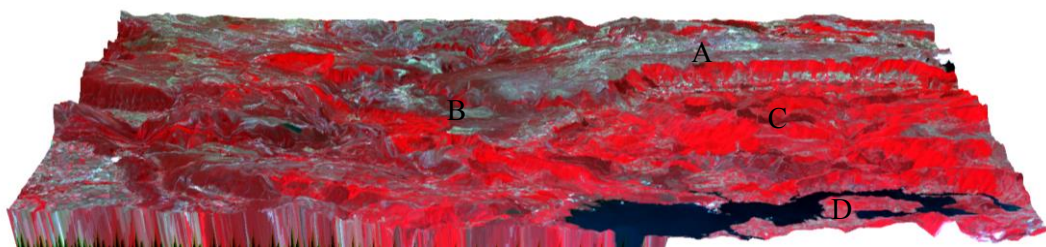


MDT dirección este-oeste





MDT dirección norte-sur



*Figura 107: Modelo Digital del Terreno de la zona 1.*

A: Paramera de la Lora.

B: Desfiladero del Ebro.

C: Montañas de Burgos.

D: Embalse del Ebro.

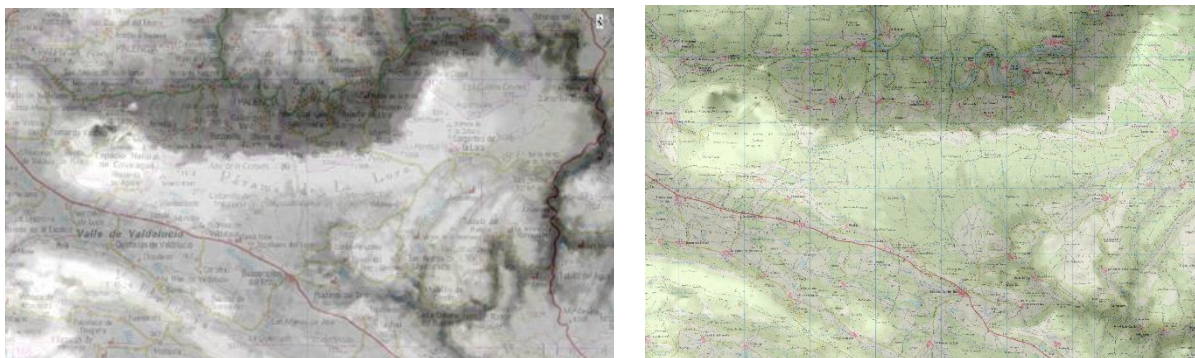
#### **4.6.2 Validación MDT**

A continuación se añaden las verificaciones realizadas, planimétricas y altimétricas, realizadas para el MDT obtenido.

Para la planimetría se cargaron el mapa provincial de Burgos a escala 1:200.000 y la hoja 134 del MTN 1:50.000. Los resultados se ven en la siguiente imagen (figura 7).

Ambas superposiciones muestran un ajuste aparente al perímetro de la paramera de la Lora. También se superpuso la orofoto del PNOA correspondiente a la hoja 134 del MTN 1:50.000, y ratificó lo expuesto anteriormente.

Para la verificación altimétrica se utilizaron los estadísticos correspondientes a la zona de interés; dicha zona fue una extracción realizada del MDT del mapa provincial de Burgos a escala 1:200.000; los resultados se pueden ver a continuación.



*Figura 108: verificación MDT mediante superposición de cartografía.*

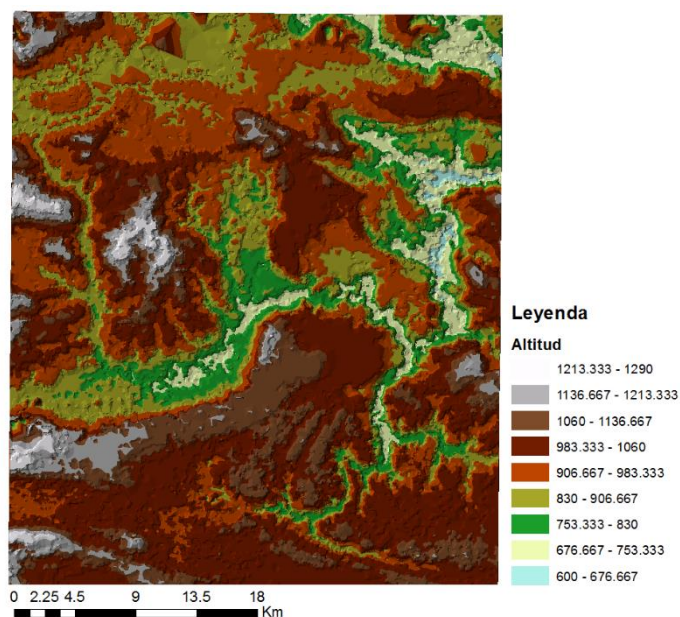


Figura 109: altitudes de la zona 1 obtenidas a partir del MDT.

Los estadísticos correspondientes a la clasificación de altitudes se ven en la siguiente figura.

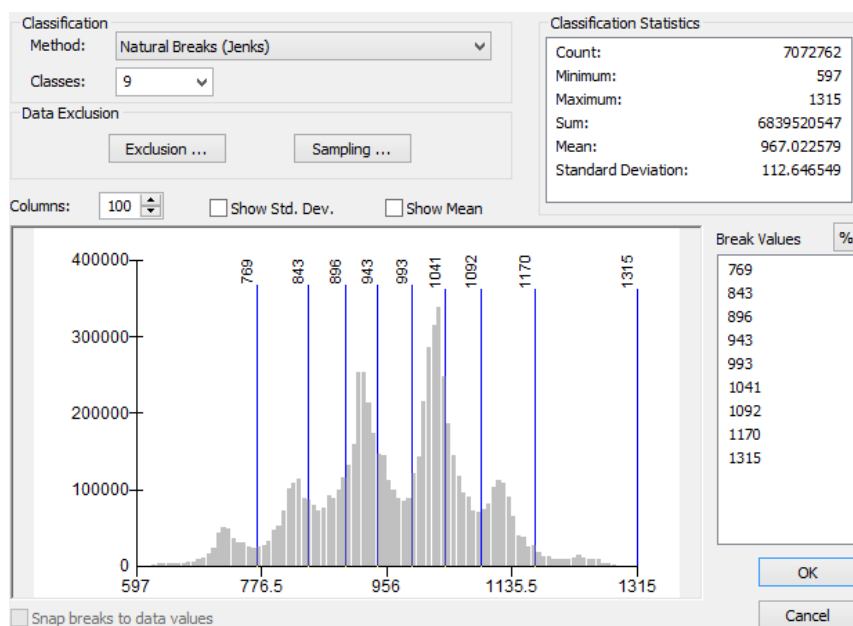
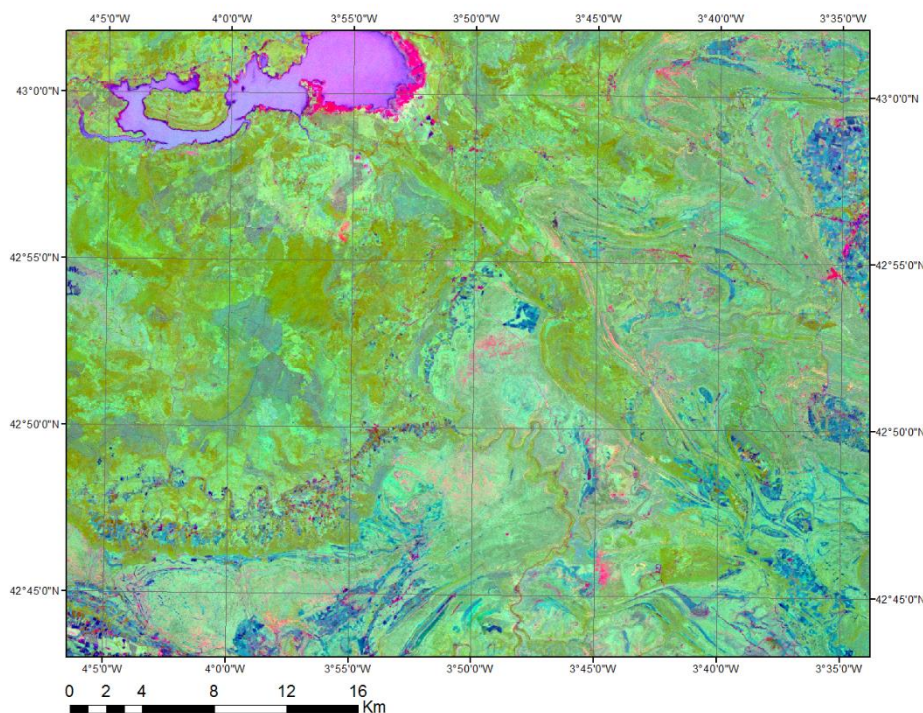


Figura 110: estadísticos obtenidos del MDT de la zona 1.

Si se compara con los datos obtenidos en la sección de estudio del medio físico se puede ver cómo los valores y las distribuciones de intervalos son muy parecidos. Se identifican los cerros de altura variable sobre la paramera, así como su altitud media en torno a los 1000 m.

#### 4.7 Cálculo de anomalías en torno al campo petrolífero de Ayoluengo

La siguiente imagen muestra los resultados de aplicar la función de componentes principales y representar el resultado mediante una combinación falso color al conjunto de datos.



*Figura 111: aplicación de componentes principales a imagen ETM+ y posterior representación en falso color.*

En esta imagen se seleccionaron zonas próximas al campo de Ayoluengo, que presentaban anomalías, y se definieron umbrales máximos. Después, utilizando el árbol de decisiones se proyectaron los resultados sobre la hoja 134 del MTN 1:50.000. Los resultados se pueden ver en la siguiente imagen. Se verificó que gran parte de la zona, probablemente afectada, coincide, en cuanto a la cartografía de referencia, con zonas de explotación del recurso buscado. Destacan los siguientes: Campo petrolífero de Ayoluengo, Basconcillos del Tozo y Prádanos del Tozo. Es interesante cómo canteras de arcilla caolinítica, grava y arena también son clasificadas como zonas alteradas. La literatura estudiada establece que los materiales citados anteriormente son susceptibles de alterarse químicamente por la influencia de hidrocarburos (Freek D. Van der Meer, 2001). Se añaden dos detalles del MTN, que ratifica lo comentado anteriormente.



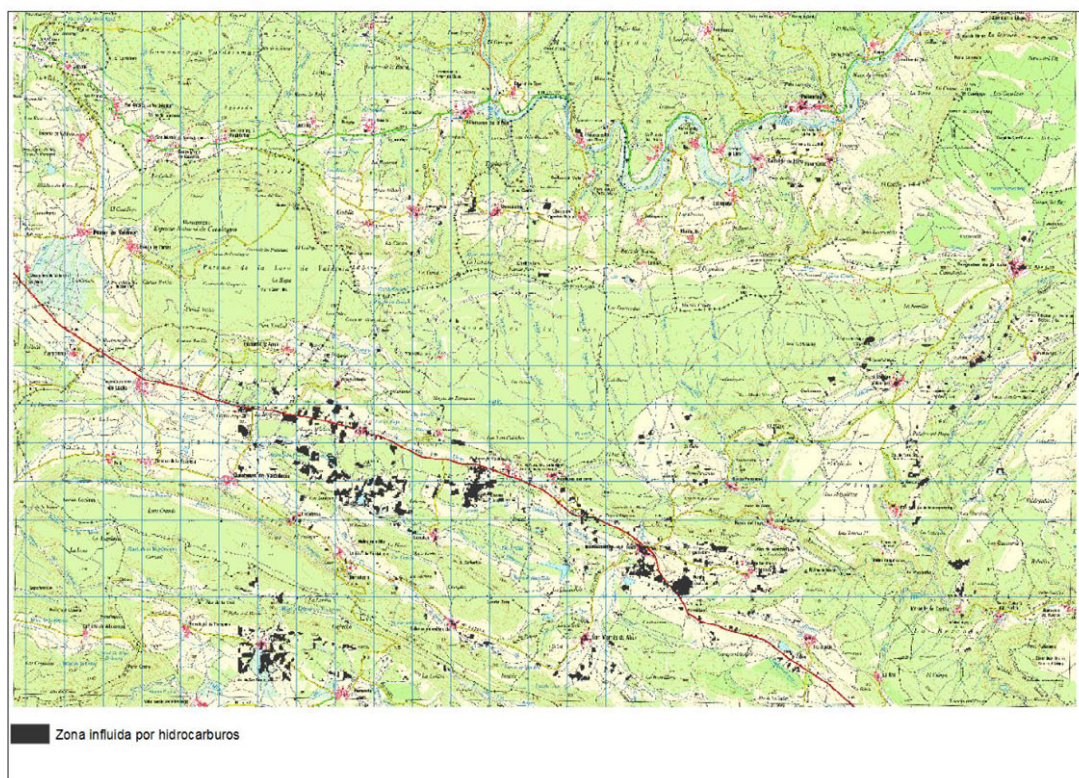


Figura 112: materiales probablemente influidos por la presencia de hidrocarburos.



Figura 113: detalle de posibles zonas alteradas por la influencia de hidrocarburos.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el sensor ASTER. Para la obtención de zonas con alto contenido en carbonato cálcico la literatura sugiere, o emplear cocientes entre bandas, o bien el uso de componentes principales y una combinación falso color. En este apartado se opta por la segunda solución. Las bandas seleccionadas fueron 3, 4, 5 y 9 y la combinación de bandas es R (3), G (5), B (9). Las manifestaciones anómalas se pueden identificar en la gama de tonos violáceos y púrpúreos.

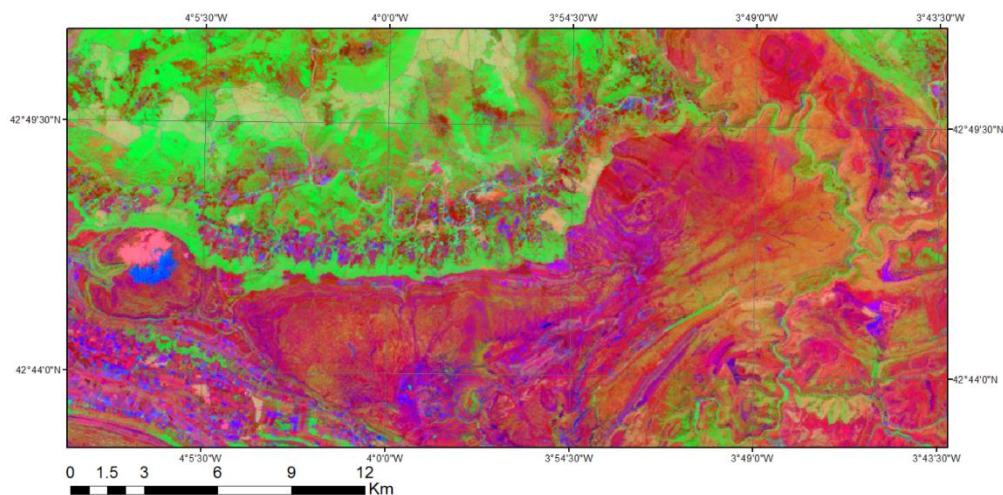


Figura 114: posibles alteraciones de materiales compuestos fundamentalmente por carbonato cálcico.

Las consideraciones del apartado anterior son válidas para este. Destaca en el Páramo de Valdivia la nube y su sombra que se manifiesta con tonos fosforescentes. Los cuasi inapreciables tonos verdes claros, zona próxima a los campos de Ayoluengo, presentan plausibles anomalías en suelos con contenido en óxido de hierro. Las bandas usadas para su representación fueron 1, 3, 5 y 9. La composición falso color se realizó según la combinación R (5), G (4), B (3).

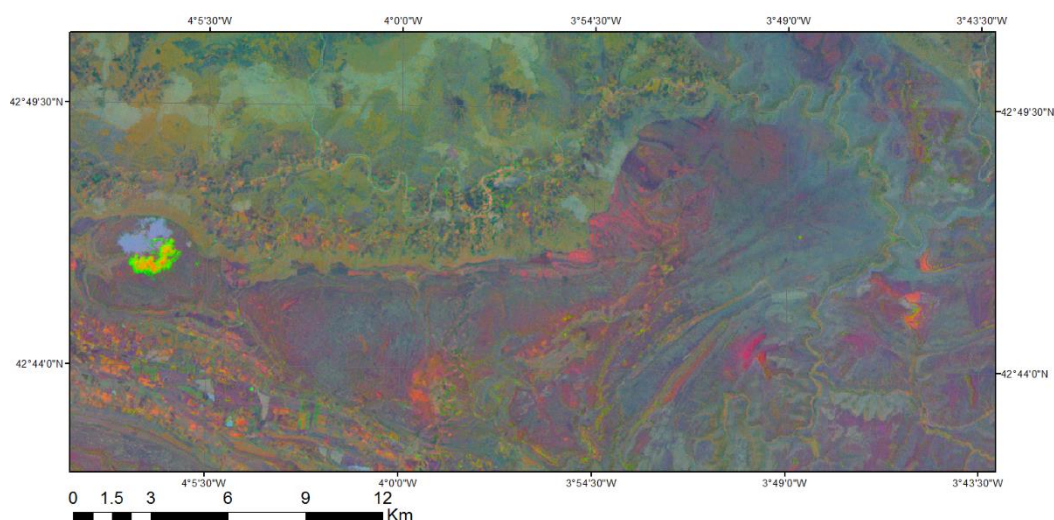


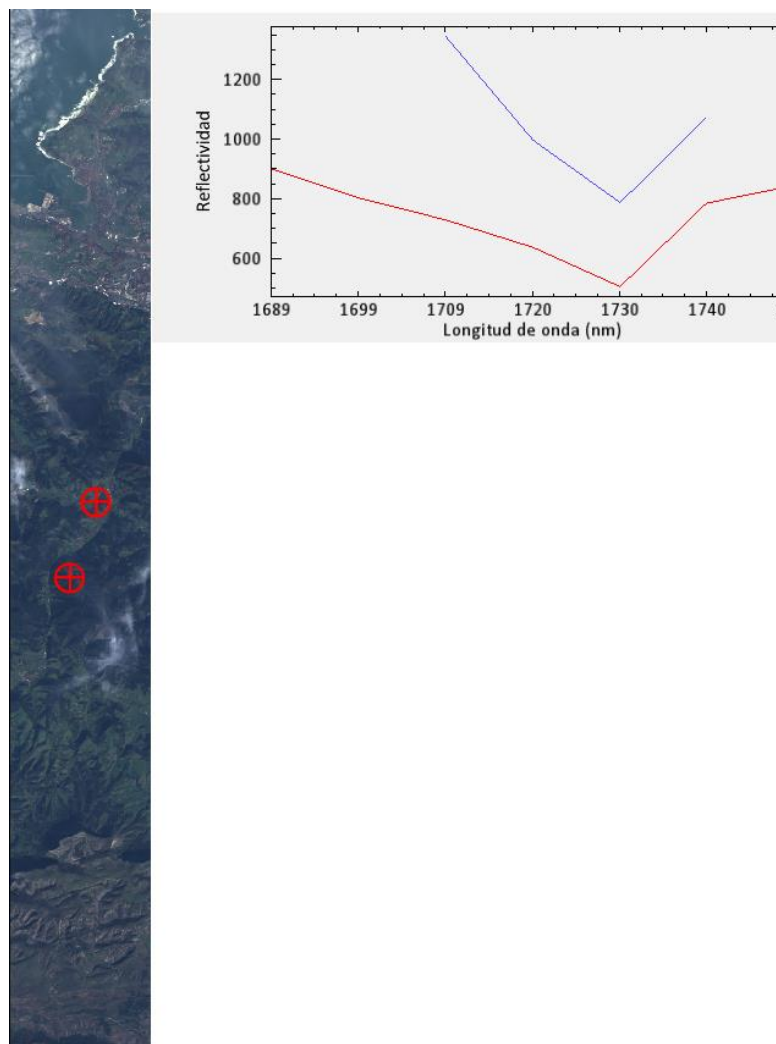
Figura 115: posibles alteraciones de materiales compuestos fundamentalmente por óxidos de hierro.



Es interesante que el procedimiento sugerido, para imágenes capturadas por el sensor ASTER, por la referencia estudiada en el estado del arte, no produce ningún dato diferente de los que se muestran en las demás secciones. Por ese motivo no se incluye.

#### **4.8 Localización directa de materiales con presencia de hidrocarburos mediante teledetección hiperspectral**

Una vez los datos han sido corregidos de los efectos atmosféricos, se pueden eliminar las bandas defectuosas (no se necesita en ningún otro paso las 242 bandas). De las 242 bandas en las que registra el sensor se encontró que sólo 196 de ellas contienen información. Después de realizar una selección visual banda a banda, cada imagen se quedó con 106, 100 y 93 bandas. La función MNF minimiza el efecto sonrisa. En su aplicación directa se seleccionaron las primeras 20 bandas; posteriormente se empleó la función inversa de las bandas seleccionadas para mantener el dominio espectral inicial. Finalmente se aplicó el índice de hidrocarburos y se verificó el mínimo relativo en la longitud de onda 1730 nm.



*Figura 116: puntos con posible presencia de hidrocarburos. Perfiles espectrales asociados a los puntos en cuestión. El inferior corresponde al perfil rojo, mientras que, el superior corresponde al perfil azul.*

La cruz filar inferior se corresponde con el detalle del perfil espectral rojo; la superior corresponde al perfil espectral azul. Según la literatura revisada y los casos prácticos estudiados, el mínimo en la longitud de onda 1730 nm corresponde a material con alto contenido en hidrocarburos. Faltaría un reconocimiento en campo para validar y obtener el tipo de material que se trata.

Las otras dos imágenes no muestran píxeles con índice de hidrocarburo superior a 0. Destaca como la otra imagen, que tenía la misma cobertura que la imagen anterior, presentaba píxeles con índice de hidrocarburo superior a 0; no obstante, dicho índice se encontraba en zonas con densidad de nubes considerable. Con esto queda de manifiesto que, las imágenes con gran porcentaje de nubosidad pueden generar resultados falsos (en el caso de utilizar imágenes hiperespectrales capturadas por plataformas espaciales).



## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

En este apartado se extraen conclusiones de los apartados anteriores. También, se proponen futuras líneas de investigación que pueden servir para futuros Trabajos Fin de Grado o para publicaciones de diversa índole.

### 5.1 Conclusiones

En todo el desarrollo del presente proyecto se consideró la correspondiente guía docente de la asignatura, Trabajo Fin de Grado. Considerando los objetivos que establece dicha guía, se intentó en todo momento revisar, aplicar y profundizar en las distintas asignaturas que intervienen, en mayor o menor medida, en el actual Trabajo Fin de Grado.

El estudio de los fundamentos de las materias que intervienen en el actual Trabajo Fin de Grado, así como el estado del arte, sirvió para establecer pautas que determinarían la dirección a seguir por el Trabajo Fin de Grado.

El análisis de los sistemas de captura de imágenes, desde plataformas espaciales, permite entender las limitaciones y prestaciones de los sistemas espaciales utilizados. No obstante, aunque los datos mostraron una buena georreferenciación, según el sistema de referencia y criterio utilizado, y una buena respuesta espectral, no se garantiza que siempre sea así. Para la planificación de cualquier proyecto se ha de revisar y estudiar cuál es el programa óptimo y qué puedo esperar del mismo. Sólo siendo conscientes de estos parámetros, se garantiza la calidad del trabajo desarrollado.

El estudio del medio físico puede parecer a primera vista algo confuso y poco relacionado con los objetivos del presente proyecto. Desafortunadamente, las entidades administrativas que proporcionan los datos, generan documentos y bases cartográficas completamente heterogéneas. Esto queda recogido en la obra de Miguel Alonso Aguiló (2004). Por este motivo no se ofrece una solución integral adaptada a la escala de la zona de estudio. Esto no significa que no haya sido fructífero; se encontró de gran ayuda para la definición de las distintas clases espectrales. También gracias a dicho estudio se reconocieron materiales, formas de relieve, variaciones climáticas, y características interesantes de la zona de estudio. Sin el estudio del medio físico, no habría tenido sentido las secciones que se desarrollaron después.

Los modelos de clasificación que se proponen en este Trabajo Fin de Grado no son ninguna novedad; solamente, se ha enfocado de una manera diferente, combinando técnicas y datos adquiridos por distintos programas espaciales. Resulta interesante lo semejantes que pueden resultar las clasificaciones por métodos diferentes y por sensores diferentes, como es el caso de la clasificación supervisada y la no supervisada empleada en las imágenes registradas por los

sensores TM-4 y ASTER respectivamente. La familiarización con nuevas formas de clasificación, así como con software diferente para ejecutar las mismas, permite diseñar y plantear futuras metodologías que guardan una estrecha relación con la Teledetección y la Geomática. Finalmente se comenta que no se ha encontrado que un software trabaje mejor que otro (salvo el caso de Arcgis e Idrisi). En cualquier caso los otros utilizados son complementarios.

La revisión de los modelos atmosféricos y la programación de algunos de ellos permitieron afianzar conocimientos y comprender mejor el flujo de trabajo que llevan asociados los procesos que intervienen en proyectos de Teledetección. El modelo DOS-4 es el método de corrección atmosférica, basado en datos de la propia escena, que mejores resultados mostró para la corrección atmosférica de imágenes multiespectrales. En el caso de las imágenes hiperespectrales se encontró que el módulo FLAASH es más realista que el módulo QUAC, al considerar el aporte por dispersión. El estudio de este fenómeno también sirvió para tener en cuenta en que situaciones está justificada la corrección atmosférica.

La obtención de temperaturas de la superficie sirvió para evidenciar el cambio físico de la Paramera de la Lora. No se consiguió demostrar la hipótesis planteada inicialmente, pero los resultados obtenidos pueden servir para futuras intenciones investigadoras.

El Modelo Digital del Terreno obtenido a partir del par estereoscópico capturado por el sensor ASTER, presenta, aparentemente, una calidad suficiente como para realizar muchos de los cálculos realizados en el estudio del medio físico. Sirvió también para tener una idea tridimensional del terreno que, algunas veces, resulta más amena que la interpretación por isohipsas.

Respecto al uso de los métodos indirectos, para evaluar la medida en la que está influido el medio próximo a una reserva de hidrocarburos, el resultado fue bueno. La evaluación de los resultados se realiza por la correspondencia de los píxeles clasificados como “zona influida por hidrocarburos” con los elementos cartográficos que hacen referencia a mecanismos de extracción de petróleo y gas. Para proponer futuros proyectos basados en estos resultados hace falta un reconocimiento de campo. Funcionó muy bien el operador matemático denominado como componentes principales en comparación con el cociente entre bandas, en donde el análisis por componentes principales mostró una mejor solución.

La metodología seguida para la localización directa de materiales con presencia de hidrocarburos generó dos posibles puntos que se corresponden con el mínimo en la longitud de onda 1730 nm. Dicho mínimo sugiere una alta probabilidad de materiales con presencia de hidrocarburos. Igual que en el apartado anterior, un reconocimiento en campo validaría lo obtenido en este apartado. Los pasos realizados para la optimización de imágenes hiperespectrales han proporcionado nuevas herramientas que sirven para hacer frente a posibles proyectos futuros.

## **5.2 Líneas futuras de investigación**

La primera línea de investigación que se propone es la validación de los resultados obtenidos para la localización de hidrocarburos mediante métodos directos e indirectos. Dicho procedimiento se puede realizar mediante el análisis de resultados de un vuelo fotogramétrico no convencional, es decir, un vuelo que capture datos mediante un sensor hiperespectral tipo HYMAP. También se puede ir a la zona de estudio con un espectrómetro y obtener caracterización espectral puntual de las zonas que presentan posible manifestación de hidrocarburos.

La segunda línea de investigación que se propone es la de verificar el Modelo Digital del Terreno, obtenido mediante el sensor ASTER, mediante puntos de apoyo en campo; normalmente, se trataría de campañas de corta duración en las que se puede observar por técnicas GNSS mediante métodos cinemáticos, por ejemplo, y obtener resultados en tiempo real.

La tercera línea de investigación que se propone es verificar la hipótesis planteada para la relación geología-temperatura, mediante observaciones de temperatura *in situ* con instrumentación más sofisticada. En la medida en la que se ha desarrollado el actual Trabajo Fin de Grado no se encontró nada relacionado con el tema y podría ser interesante.

Finalmente se propone la programación del módulo DOS-4, así como gran parte de los procedimientos que se exponen en este Trabajo Fin de Grado, de forma automática en el lenguaje de programación IDL. Se propone este lenguaje de programación ya que es bastante usado por las capacidades que ofrece. La adaptación a cualquier otro lenguaje de programación, o software, es posible.

## CAPÍTULO VI. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y ESTUDIO ECONÓMICO

Siguiendo los objetivos planteados para el actual Trabajo Fin de Grado, como objetivo secundario, se presenta un presupuesto atendiendo a un diagrama de Gantt que contiene el desarrollo del proyecto especificado en distintas fases. Para la planificación se tuvo en cuenta las fases planteadas en el estudio temporal presentado en la propuesta de este trabajo. Para el presupuesto se establecieron gastos directos e indirectos.

### 6.1 Presupuesto

El presupuesto para este tipo de proyectos es bastante complicado de calcular. En la definición del proyecto no se sabía si se podía obtener resultados en cuanto a la caracterización del medio físico influido por una reserva de hidrocarburos y a la localización directa de materiales con presencia de hidrocarburos.

Para la elaboración de este presupuesto se ha utilizado del software MS Project 2010.

Los recursos asignados al presente Trabajo Fin de Grado han sido, Graduado en Ingeniería Geomática y Topografía, un programador, las amortizaciones de software y hardware (en las que se considera consumo energético por las terminales usadas, así como las licencias de los programas utilizados), recursos literarios (en los que se incluye la compra de cuatro artículos y tres libros), imágenes multiespectrales e hiperspectrales (cuatro imágenes multiespectrales y tres hiperspectrales) y finalmente los gastos indirectos. La cuantía económica de cada recurso se desglosa en la siguiente tabla.

*Tabla 22: recursos y cuantía económica.*

<b>Grado en Ingeniería Geomática y Topografía</b>	<b>trabajo</b>	<b>65 €/h</b>
<b>Programador</b>	<b>trabajo</b>	<b>30 €/h</b>
<b>Software y Hardware</b>	<b>trabajo</b>	<b>1 €/h</b>
<b>Recursos literarios</b>	<b>material</b>	<b>200 €</b>
<b>Imágenes multiespectrales</b>	<b>material (1 u)</b>	<b>100 €</b>
<b>Imágenes hiperspectrales</b>	<b>material (1 u)</b>	<b>150 €</b>
<b>Gastos indirectos</b>	<b>trabajo</b>	<b>1.50 €/h</b>

En la siguiente imagen se puede ver el diagrama de Gantt con los recursos asignados a las distintas fases del proyecto.

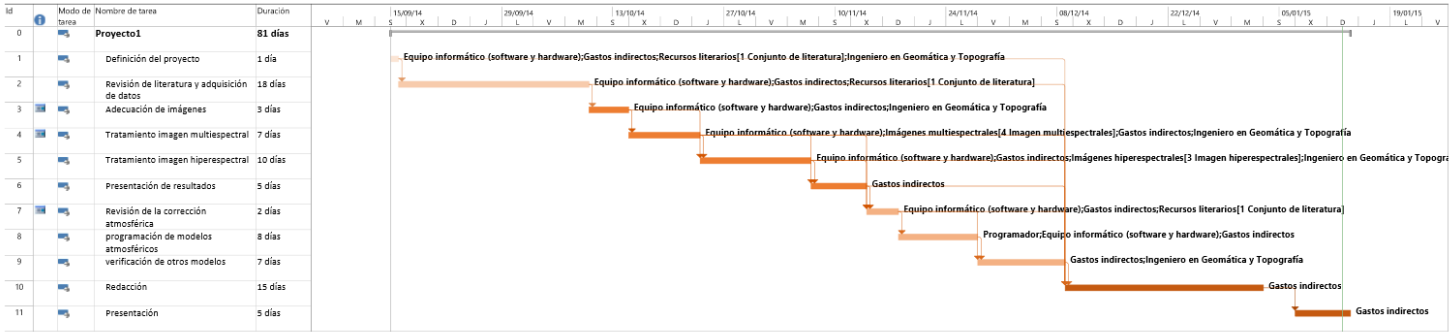


Figura 117: diagrama de Gantt con asignación de recursos.

Atendiendo al diagrama anterior y a los costes por unidades se presenta el siguiente presupuesto general.

Nombre	Costo
Definición del proyecto	470.00 €
Revisión de literatura y adquisición de datos	380.00 €
Adecuación de imágenes	810.00 €
Tratamiento imagen multispectral	2,290.00 €
Tratamiento imagen hiperspectral	3,150.00 €
Presentación de resultados	30.00 €
Revisión de la corrección atmosférica	220.00 €
Programación de modelos atmosféricos	1,040.00 €
Verificación de otros modelos	1,862.00 €
Redacción	90.00 €
Presentación	30.00 €

Total ejecución material	10.372 €
Beneficio industrial (15%)	1.555,80 €
I.V.A (21%)	2.504,838 €
Total presupuesto general	14.431,94 €

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de CATORCE MIL CUATROCIENTOS TREINTA Y UNO con NOVENTA Y CUATRO CÉNTIMOS.

## Bibliografía

- Abrams m., Hook s. (s.f.). *ASTER user guide handbook*.
- Aguilo A. (2004). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. Ministerio del Medio Ambiente.
- Chandrasekhar S. (2003). *Radiative transfer*. Dover Publications.
- Chuvieco E. (2000). *Fundamentos de Teledetección*. Madrid.
- Guitérrez Elorza M. (2008). *Geomorfología*. Madrid: Pearson Educación.
- Hörig B., Kühn F. , Oschütz F. & Lehmann F.;. (2001). HyMap hyperspectral remote sensing to detec hydrocarbons. *International Journal of Remote Sensing*, 1413-1422.
- Noomen M. F., Skidmore A.K., Van der Meer F.D. (2010). Detecting the Influence of Gas Seepage on Vegetation, using Hyperspectral Remote Sensing. *3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*.
- Ortega Valcarcel J. (1974). *Las transformaciones de un espacio rural. Las Montañas de Burgos*.
- Requena A., Zúñiga J. (2004). *Espectroscopía*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Spathopoulos F. and Sephton. (2013). Unconventional Petroleum Plays in the Mediterranean Basins. *AAPG*.
- Verweij J. M. (1993). *Hydrocarbon Migration System Analysis*. Delft: ELSEVIER.
- Yang H. (1999). *Phd thesis: Imaging Spectrometry for Hidrocarbon Microseepage*. Delft: ITC publishers.
- ZHANG G., SHEN X., ZOU L., LU S. (2007). Identifying hydrocarbon leakage induced anomalies using Landsat-7 /ETM+ data. *Asian Association of Remote Sensing*.
- AEMET. (2000). *Atlas Climático de la Península Ibérica*.
- Barberii, E. E. (1996). *El Pozo Ilustrado*. Caracas: PDVSA.
- Beck, R. (2003). *EO-1 user guide*. Ohio: USGS .
- Berger, Z. (1994). *Satellite Hydrocarbon Exploration*. Alberta: Springer-Verlag.
- Canty M. J. (2010). *Image Analysis, Classification, and Change Detection in Remote Sensing*. CRC Press.
- CASAS C., F. E. (1992). APORTACIONES A LA FLORA BRIOLOGICA ESPAÑOLA. NÓTULA VIII. LOS PARAMOS DE LA LORA (BURGOS, ESPAÑA). *svtudia Botánica*, 109-122.
- Chander G., M. B. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 sensors. *Remote Sensing of Environment*, 893-903.
- Chen, L.-C. (2011). Geometric Processing for Satellite Images. *Principles of Space Remote Sensing*.
- CLOUTIS, E. A. (1989). Spectral Reflectance Properties of Hydrocarbons. *Science*, 164-168.
- Colwell, R. (1983). *Manual of Remote Sensing*. Virginia: Am. Soc. Photogrammetry.

- Dijkers, A. (1985). *Geology in Petroleum exploration*. Netherlands: ELSEVIER.
- Elachi C, Jakon van Zil. (2006). *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Ellis, J., & H.H. D. (2000). Airborne hyperspectral imagery for the petroleum industry. *Internation Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, 89-96.
- Exelis. (2009). Atmospheric Correction Module User's Guide.
- Freek D. Van der Meer, S. M. (2001). *Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective applications*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- González Pellejero R. (1984). Dinámica de un espacio natural: los cañones calcáreos del Ebro (Burgos). *memoria de licenciatura*. Santander.
- Goosle, S. (2011). Analyzing Remote Sensing Data in R: The landsat Package. *Journal of Statistical Software*.
- Gupta, R. P. (2003). *Remote Sensing Geology*. New York: Springer-Verlag.
- Historia 16 de Burgos. (1993). *Diario 16 de Burgos*, 15-26.
- IGME. (1992-1993). Cartografía geológica de las hojas: Polientes y Sedano. *memoria*. IGME.
- Kaufman, Y. (1989). *The atmospheric effect on remote sensing and its correction*. New York: G. Asrar.
- Kaufman, Y. J., A. E. Wald, L. A. Remer, B.-C. Gao, R.-R. Li, and L. Flynn. (1997). The MODIS 2.1- $\mu\text{m}$  Channel-Correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1286-1298.
- Khün F., Oppermann K., Hörig B. (2004). Hydrocarbon index, an algorithm for hyperspectral detecton of hydrocarbons. *International Journal Remote Sensing*.
- Li Z., Z. Q. (2005). *DIGITAL TERRAIN MODELING: principles and methodology*. CRC press.
- Lillesand T.M, Kiefer R. W. (2004). *REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION*. John Wiley & Sons, Inc.
- NASA. (2011). *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*. Springer.
- Octavio Puche Riart, Luis F. Mazadiego Martinez and Jose E. Ortiz Menendez. (2011). Petroleum In The Spanish Iberan Peninsula. *History of Research in Mineral Resources. Cuadernos del Museo Geominero*.
- Olsen C. R. (2007). *Remote Sensing from Air and Space*. SPIE.
- Ormeño S. (2006). *Teledetección Fundamental*. Madrid.
- Pilong Shi , Bihong Fu a, Yoshiki Ninomiyab. (2010). MAPPING HYDROCARBON SEEPAGE-INDUCED ANOMALIES IN THE ARID REGION, WEST CHINA USING MULTISPECTRAL REMOTE SENSING. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*.
-



- Plummer, Charles ; Carlson, Diane; Hammersley, Lisa. (2012). *Physical Geology*. McGraw-Hill.
- Quesada S., R. S. (1996). Caracterización de la roca madre del Lías y su correlación con el petróleo del campo de Ayoluengo en base a análisis de cromatografía de gases e isótopos de carbono (Cuenca Vasco-Cantábrica, España). *GEOGACETA*, 176-179.
- Richards J., X. J. (1999). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer-Verlag.
- Schowengerdt R. (2007). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Academic Press.
- Schumacher, D. (1996). Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. *AAPG*, 71-89.
- Selley, R. C. (1998). *Elements of Petroleum Geology*. California: Academic Press.
- Song C, W. C. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and how to correct Atmosphere Effects. *Remote Sensing of Environment*, 230-244.
- Swain P H., D. S. (1978). *Remote sensing, The Quantitative Approach*. McGraw-Hill.
- Tian, Q. (2012). STUDY ON OIL-GAS RESERVOIR DETECTING METHODS USING HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 157-162.
- Toutin, T. (2004). Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 1893-1924.
- USGS. (1984). *LANDSAT-4 DATA USERS HANDBOOK*.
- USGS. (2013). *LANDSAT THEMATIC MAPPER LI DATA FORMAT CONTROL BOOK*. Dakota.
- USGS. (s.f.). *LANDSAT-7 DATA USERS HANDBOOK*.
- Vermote E., D. Tanré, J. L. Deuzé, M. Herman. (2006). Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector (6SV). *6S User Guide Version*.

## ANEXOS

### Curiosidades sobre el campo petrolífero de Ayoluengo.

El 25 de febrero de 1966, el periódico ABC publicó el siguiente artículo.

### ANTE LOS INDICIOS DE NUEVOS HALLAZGOS SE RUMOREA LA POSIBLE EXTENSIÓN DEL CAMPO PETROLÍFERO DE AYOLUENGO

Burgos 24. Con el hallazgo de indicios de petróleo a nueve kilómetros del primer sondeo, "Ayoluengo-1", que mostró la existencia de petróleo por primera vez en España, los rumores sobre la posible extensión del campo de Ayoluengo—nueve kilómetros de longitud por cuatro de anchura máxima—parecen confirmarse. Los indicios encontrados a mil setecientos setenta y cinco metros de profundidad son muy ligeros, sin embargo, el "valor mayor radica en que se han encontrado una capa permeable" que hace posible que una vez terminado el sondeo, que llegará hasta los dos mil metros, los indicios sean más claros. Sobre la posibilidad de que sea la continuación del campo petrolífero de Ayoluengo, todavía no puede saberse con certeza.

El sondeo forma parte de una serie de ellos que se vienen realizando en torno al campo de Ayoluengo, ya determinado, para comprobar si existen otros campos o continuación del mismo. El sondeo positivo fue obtenido al noreste del pozo "Ayoluengo-1", en la carretera de Burgos a Santander y en el término municipal de Escalada, muy próximo al río Ebro.

Se sabe ya que, en el campo de Ayoluengo, se pueden obtener hasta dos millones de toneladas al año, pero no se sabe cuánto tiempo podrá obtenerse esta cifra. Hasta ahora, lo único que se viene haciendo son los sondeos y pequeñas pruebas sobre algunas de las capas petrolíferas encontradas. No se han realizado ni pruebas largas a fin de conocer la realidad del yacimiento, ni se han examinado todas las capas con detalle. Se quiere primero conocer el campo para hacer luego cada una de estas pruebas.

Por lo pronto, se viene estudiando la instalación de un oleoducto desde el yacimiento de Ayoluengo hasta la carretera de Burgos a Santander, a fin de poder llevar el petróleo hasta Bilbao para ser refinado. La continuación del oleoducto hasta Bilbao dependerá de la capacidad del yacimiento.—*Cifra.*

El año 1963 es usado para hacer referencia al año en que se encontraron reservas de hidrocarburos en España, no obstante, su explotación no se inicia hasta 1964. A pesar de la revuelta que causó el descubrimiento, el paso del tiempo no favoreció la situación de dichos campos. Hoy en día se conservan mecanismos de extracción del petróleo, pero se podría decir que sólo tienen interés histórico. Una muestra de esto es el *machine* que se muestra en la siguiente figura.



Figura 118: machine de extracción de petróleo localizado en Ayoluengo. Fuente: Kurrus.

La baja productividad, comparada con las estimaciones realizadas, generó que las compañías perdieran interés en estos campos. En la gráfica que se muestra a continuación se muestra el cambio en productividad, así como el cambio de pertenencia que ha tenido el campo petrolífero a lo largo del tiempo.

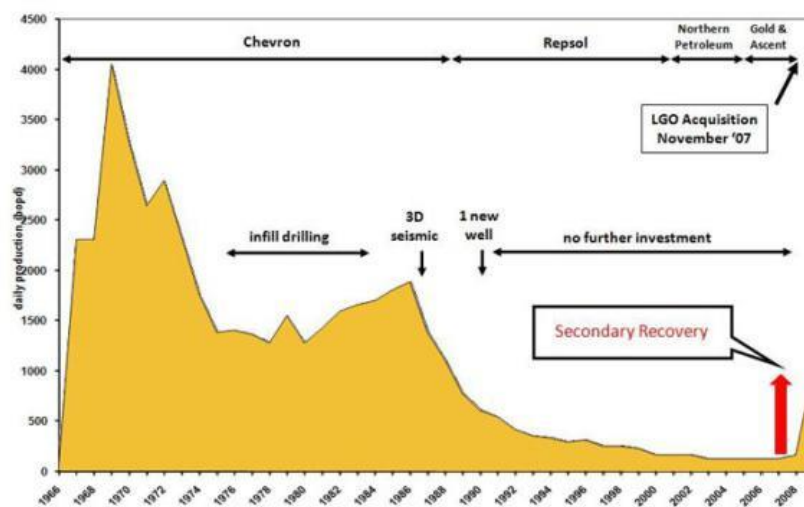


Figura 119: evolución de la extracción de hidrocarburos de la reserva de Ayoluengo. Fuente: nataliamunozrujas.